



Mecânica Quântica para jovens sonhadores

ALBERTO REIS

COM O PREFÁCIO DE
FERNANDO DE MELO



A334 Reis, Alberto.

Mecânica quântica para jovens sonhadores /
Alberto Reis. - Rio de Janeiro: CBPF, 2025

94 p.

ISBN 978-85-99957-06-6

1. Teoria Quântica. 2. Física. I Título

CDD 530.12

Núcleo de Informação CT e Biblioteca – NIB/CBPF
Fátima Silva – CRB/7 5277

Capa: Natália Luz

Revisão técnica: Fernando de Melo

Mecânica Quântica para jovens sonhadores

Alberto Reis
CBPF

Prefácio

O ano de 2025 foi declarado pela Organização das Nações Unidas (ONU) como o Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quânticas. O principal objetivo dessa iniciativa é aumentar a conscientização pública sobre os fascinantes temas da ciência quântica e suas diversas aplicações.

Já na virada do século XX, tornava-se evidente que as teorias fundamentais da física conhecidas na época – a física Newtoniana, o eletromagnetismo e a termodinâmica – não eram suficientes para explicar certos resultados experimentais. Começou então a “gestação” da Mecânica Quântica. Participaram desse processo vários dos mais brilhantes cientistas da época, com contribuições singulares por Albert Einstein, Niels Bohr, Hans Kramers, e Paul Ehrenfest, para citar alguns. Contudo, foi apenas em 1925 que a teoria quântica “nasceu”, sendo formalizada principalmente nos artigos escritos naquele ano por Werner Heisenberg, Max Born & Pascual Jordan, e Paul Dirac. É esse “nascimento” da teoria quântica, que então completa 100 anos em 2025, que foi escolhido como marco pela ONU.

Ao longo de seu primeiro século de existência, a ciência quântica foi submetida a inúmeros testes sem ter falhado em quaisquer um deles, tendo suas previsões confirmadas com precisões espetaculares. Apesar de centenária e de sua estrondosa validação, as ideias e aplicações da MQ ainda não são amplamente assimiladas pelo público em geral. Essa lacuna de entendimento, além de abrir espaço para apropriações indevidas por charlatões, prejudica o próprio desenvolvimento das ciências quânticas, bem como furta a população da fascinante mudança de paradigma sobre a Natureza que a Mecânica Quântica nos oferece. Isso faz com que a celebração da ciência quântica e suas aplicações proposta pela ONU seja tão louvável quanto oportuna, especialmente ao buscar conscientizar o público sobre sua relevância.

Resta-nos analisar algumas das possíveis razões pelas quais a teoria quântica e suas aplicações não são devidamente percebidas ou compreendidas pelo público geral. Uma hipótese é que os fenômenos quânticos não estão presentes em nossa vida cotidiana. Embora seja verdade que não necessitamos entender Mecânica Quântica para navegarmos no dia a dia, estamos completamente rodeados por tecnologias que só se tornaram possíveis graças ao desenvolvimento da quântica. Por exemplo, os telefones celulares que carregamos rotineiramente nos bolsos contêm bilhões de transistores. O funcionamento desses componentes eletrônicos miniaturizados é explicado pelo fenômeno do tunelamento quântico, onde elétrons conseguem atravessar barreiras de energia mais altas do que sua própria energia – algo que, de acordo com a física pré-1925, não seria possível. Máquinas hospitalares de ressonância magnética, lasers, luz fluorescente, placas solares... os exemplos são inumeráveis. Estima-se que de 30 a 35% do Produto Interno Bruto (PIB) dos Estados Unidos seja baseado em invenções derivadas da Mecânica Quântica. Vale ainda destacar que muitas outras tecnologias quânticas estão por vir, como computadores quânticos, redes quânticas de comunicação e sensores quânticos, que prometem revolucionar nossa sociedade e vão requerer um ainda maior letramento quântico. Fica claro, portanto, que a hipótese levantada não se sustenta.

Outra possibilidade é que a matemática envolvida na Mecânica Quântica seja inacessível para o público não especializado. O principal ramo da matemática utilizado na Mecânica Quântica é o da Álgebra Linear ¹. Esse ramo trata das equações e mapas lineares e suas representações como espaços vetoriais e matrizes. A solução de sistemas lineares de equações remonta à China antiga, mas a formalização da álgebra linear, tal como a conhecemos hoje, ocorreu, coincidentemente ou não, pouco

¹Equações diferenciais também são utilizadas na Mecânica Quântica para descrever a dinâmica dos sistemas quânticos. Além desse fato não ser de extrema importância para entender vários dos fenômenos quânticos, tais equações também são encontradas na mecânica Newtoniana, eletromagnetismo, e termodinâmica.

antes do nascimento da MQ. Por exemplo, foi apenas em 1856 que Arthur Cayley introduziu a operação de multiplicação de matrizes e, conseqüentemente, a noção de matriz inversa. Não surpreende que Heisenberg, em seu artigo de 1925, tenha intuído corretamente que transições em MQ estão relacionadas a grandezas com dois índices, mas não tenha conseguido descrevê-las como matrizes. Ele também percebeu que a multiplicação de grandezas físicas, como velocidade e aceleração, depende da ordem em que é realizada, mas não conectou isso às regras de multiplicação de matrizes (onde para matrizes A e B , $A \times B$ é em geral diferente de $B \times A$). Tal era o desconhecimento da época sobre resultados básicos de álgebra linear, que o primeiro capítulo do artigo de 1925 de Born e Jordan foi dedicado ao “cálculo matricial”. Contudo, o que era novidade em matemática no início do século XX já não é mais hoje em dia. Sistemas de equações lineares, matrizes, multiplicação de matrizes, determinantes, vetores, números complexos... todos esses elementos são ensinados no ensino fundamental ou médio. Assim, a matemática que foi utilizada para construir a Mecânica Quântica já está sendo ensinada nas escolas, mas a teoria quântica em si, não.

Cabe, por fim, admitir o que muito provavelmente está por trás da dificuldade de assimilação dos conceitos quânticos pelo público geral: esses conceitos desafiam nossa intuição macroscópica. Como entender que um elétron pode estar na superposição de duas posições, e assim não ter a grandeza posição bem definida? Ou que existem correlações mais fortes do que as possíveis entre partículas clássicas, e que tal fato exige que abandonemos preceitos metafísicos (localidade, realismo e livre-arbítrio) tão caros para nós?

É justamente com o objetivo de criar uma nova intuição, livre de nossos preconceitos clássicos, que o livro *Mecânica Quântica para Jovens Sonhadores* foi escrito por Alberto Reis, meu estimado colega do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). No livro que você tem agora em mãos, Alberto nos guia, com a ajuda de várias analogias e explicações, através de toda a história

da MQ: sua gestação, seu nascimento e seus dias atuais. Mais importante do que oferecer uma descrição formal e precisa dos conceitos quânticos, Alberto nos transmite a intrigante beleza dessas ideias e democratiza o pensar e, por que não, o sonhar com a MQ.

Fernando de Melo,
Rio de Janeiro, 7 de Janeiro de 2025.



<https://marinamaral.com/portfolio/solvay-conference/>

Figura 1: Ernest Solvay foi um rico industrial belga. Ele usou sua fortuna para patrocinar artistas e financiar encontros científicos. As conferências Solvay foram um capítulo à parte na história da Física. As conferências reuniam os físicos mais proeminentes da época. O tema da 11ª conferência, realizada em 1927, foi a nova teoria quântica da matéria e da radiação. Naquela conferência, estavam presentes os personagens principais da criação da Mecânica Quântica.

Na primeira fileira, da esquerda para a direita: I. Langmuir, M. Planck, Mme. Curie, H. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, C. Guye, C. Wilson e O. Richardson.

Na segunda fileira, da esquerda para a direita: P. Debye, M. Knudsen, W. Bragg, H. Kramers, P. Dirac, A. Compton, L. de Broglie, M. Born e N. Bohr.

Na última fileira: A. Picard, E. Henriot, P. Ehrenfest, E. Hersen, T. De Donder, E. Schrödinger, E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R. Fowler e L. Brillouin.

Introdução

Em 1925, nasceu a Mecânica Quântica. O mundo era muito diferente naquela época. As sociedades viviam transformações profundas. Foram os tempos em que o telefone, os automóveis, os aviões, a penicilina, o cinema, o rádio, a arte moderna, a psicanálise, dentre outras novidades, foram incorporadas ao dia a dia. Nesse contexto de efervescência, surgiu a Mecânica Quântica (doravante usarei a abreviação MQ), a teoria física mais revolucionária, que permitiu criar o nosso mundo contemporâneo e digital.

A MQ está por toda parte, foi incorporada ao nosso cotidiano, mesmo que não notemos. Quando eu escrevo essa frase usando meu computador e quando você a lê, estamos usando a MQ. Mandamos mensagens dos nossos celulares para alguém do outro lado do mundo graças à MQ. Também a usamos quando vamos ao mercado: a(o) atendente escaneia um código de barras usando um leitor a laser, e pagamos com cartão de plástico com um chip que é lido por uma máquina digital ligada à internet. Entro em um elevador fazendo uma transferência bancária pelo celular, graças à miniaturização dos transístores, inventados em 1948. A porta do elevador se fecha automaticamente depois que eu passo devido a uma combinação de laser e efeito fotoelétrico. Exames de imagem detalhados, novos tratamentos, vacinas e medicamentos da medicina moderna permitem prolongar a vida e o bem estar. A lista

do que existe por causa da MQ é infundável.

A MQ é a teoria que descreve como funciona o microcosmo, o mundo do infinitamente pequeno. Sua criação teve início em 1900, e foi uma aventura intelectual sem precedentes. Foi uma obra feita a muitas mãos, especialmente as mãos de uma geração de físicos geniais, jovens nascidos entre 1900 e 1902. Seus principais criadores estão reunidos na fotografia acima, tirada em 1927 durante a mais célebre conferência da Física.

Se alguém perguntasse a algum daqueles cientistas da foto qual seria a utilidade da MQ, provavelmente ficaria frustrado com a resposta: nenhuma. A pergunta, provavelmente, causaria um certo espanto àquela senhora, Mme. Curie, e aos sisudos senhores que a circundavam. A Ciência básica sempre foi movida pela curiosidade. A pesquisa em Ciência básica cria conhecimento acerca do mundo natural, conhecimento que, cedo ou tarde, caso se faça bom uso, será aplicado de alguma maneira para o benefício de todos. Ciência e Tecnologia andam juntas, uma alimenta a outra, e cada uma tem o seu papel. Os países modernos que superaram as questões básicas da vida dos seus cidadãos são aqueles com uma longa tradição de pesquisa em Ciência básica.

A MQ propiciou à Humanidade a ferramenta mais poderosa de toda a sua história: o controle sobre os átomos. Sem o conhecimento de como funcionam os átomos, não teria sido possível entender as propriedades fundamentais da matéria em todos os seus estados, como funcionam as ligações químicas vistas de perto,

como é a estrutura do DNA e como funciona o código da vida. A invenção do microscópio eletrônico redefiniu a Biologia e o nosso entendimento sobre a vida. As invenções do transistor e do laser, entre outras, causaram a revolução tecnológica que nos levou à era da informação. Sem a MQ, não teria havido a revolução da Medicina moderna, com os equipamentos sofisticados, medicamentos, vacinas etc, que aumentaram significativamente a nossa qualidade e expectativa de vida. A imaginação é pequena para o que pode ser feito com os materiais nanoestruturados, como o grafeno, uma película em forma de teia, de apenas um átomo de carbono de espessura, e que possui propriedades absolutamente incríveis. Como será o mundo quando a computação e outras tecnologias quânticas tornarem-se uma realidade? Difícil imaginar.

Também é difícil imaginar coisas do tamanho dos átomos, eles são realmente muito, muito pequenos. Talvez seja mais fácil fazer o contrário, pensar em distâncias muito grandes. Então, imagine o que seria se um átomo fosse do tamanho de uma criança. Olhando para dentro, o núcleo atômico seria do tamanho de uma pulga. Olhando para fora, uma célula teria um diâmetro de aproximadamente 1000 km, mais ou menos a distância entre o Rio de Janeiro e Brasília. Uma pessoa adulta seria do tamanho da distância entre o Sol e o planeta Netuno. Para se ter uma ideia do que isso significa, a sonda espacial Voyager, lançada em 1977, levou quase 40 anos para chegar à Netuno, viajando a uma espantosa velocidade de 15.000 m/s.

Os conceitos da MQ são estranhos ao nosso dia a dia. Isso acontece porque quando mergulhamos no mundo microscópico, nos deparamos com uma realidade completamente diferente. No microcosmo, o próprio significado de realidade é discutível. A Lua existe, mesmo se não estivermos olhando, e temos a certeza de que amanhã ela estará novamente no céu. Mas não podemos dizer o mesmo de um elétron, pois sequer sabemos onde ele se encontra dentro de um átomo. Só podemos afirmar alguma coisa sobre um elétron quando ele interage de alguma forma com algum tipo de material, ou, em termos mais técnicos, quando fazemos uma medição sobre ele. No reino quântico, a realidade está, de certa forma, atrelada ao que podemos observar.

Pensando bem, não há porque as leis físicas que descrevem os fenômenos em escalas tão pequenas, com a dos átomos, sejam as mesmas leis com que estamos familiarizados no nosso cotidiano. No outro extremo, na escala cósmica, sabemos que o Universo segue leis físicas muito diferentes. E esse é um bom ponto de partida para nosso passeio pelo mundo quântico: perceber que leis físicas diferentes devem ser usadas dependendo da escala em que observamos a Natureza.

A MQ é cercada por uma aura de mistério e, com alguma frequência, de esoterismo e charlatanismo, talvez porque ninguém entenda direito o que ela significa. Mas é uma teoria matemática com leis bem definidas, e que, ao longo dos últimos 100 anos, tem se mostrado infalível. Apesar de todo o sucesso, ainda hoje se debate o que os seus conceitos significam. Não há consenso

– e talvez nunca haja – sobre como interpretar os diversos fenômenos bizarros com que vamos nos divertir nos próximos capítulos. Os físicos, no entanto, são pragmáticos. Usam as equações da MQ rotineiramente e com maestria, sem pensar muito em interpretações.

Não deixa de ser curioso sabermos fazer coisas maravilhosas com a teoria mais precisa jamais criada, cujo significado, no entanto, ainda não compreendemos inteiramente. Um grande físico estadunidense, Richard Feynman, disse certa vez que “Posso afirmar, seguramente, que ninguém entende a MQ”. E eu posso afirmar, também com segurança, que nosso passeio pelo mundo microscópico será bastante divertido e instigante. Vamos conhecer alguns fenômenos quânticos surpreendentes. Então, prepare-se para o diferente, o bizarro e o misterioso.

1 - A natureza da luz

Vamos começar com a luz. O que é a luz, afinal? Essa pergunta foi feita durante muitos séculos, e, como vamos ver, as respostas variaram com o tempo.

As grandes descobertas científicas nos últimos séculos foram feitas sobretudo na Europa. Mas nem sempre foi assim. Durante a Idade Média, após a queda do Império Romano, a Europa se encontrava dominada pelo obscurantismo, pela superstição e pelo fanatismo religioso. Nas principais cidades, como Londres e Paris, seus habitantes viviam em casas precárias, em más condições de higiene e saúde. Havia um contraste muito grande com o brilho e a sofisticação das culturas árabe e persa.

Durante a maior parte da Idade Média, o Império Árabe e a Pérsia foram o centro intelectual do mundo. Foi a idade de ouro do Islã. As cidades eram esplêndidas, com iluminação, abastecimento de água e redes de esgoto públicas. Havia também centros de estudos, precursores das universidades, onde floresciam a Medicina, a Filosofia, a Física, a Astronomia e as Artes. Vivia-se em uma atmosfera de tolerância religiosa e de convivência pacífica entre povos distintos. Graças aos árabes, a cultura helenística sobreviveu. Eles traduziram para o árabe os livros da Antiguidade Clássica, escritos em grego, evitando que todo o conhecimento adquirido durante séculos se perdesse para sempre. Nesse mesmo período, a Ciência florescia também no Ori-

ente, sobretudo na China que, no entanto, era um país fechado em si mesmo.

Um dos grandes cientistas árabes foi Ibn al-Haytam, nascido no ano 965 na cidade de Basra, situada no atual Iraque. Ibn al-Haytam foi o primeiro a afirmar que a luz consiste em um feixe de minúsculas partículas de energia que se propagam em linha reta e com uma velocidade muito grande, mas finita, 900 anos antes de Einstein fazer a mesma afirmação e, por ela, receber o Prêmio Nobel em 1921.

Ibn al-Haytam foi também o primeiro a afirmar que a visão se localiza no cérebro, e não nos olhos. Foi também o primeiro a afirmar que vemos os objetos não porque nossos olhos emitem raios, mas porque a luz chega até eles após ser refletida pelos objetos. Ele é também um dos pais do método científico. Para al-Haytam, qualquer ideia ou teoria somente deveria ser aceita depois de ser testada experimentalmente. No início do século XI, al-Haytam publicou o *Livro de Óptica*, uma obra monumental em 7 volumes. Em 2015 a Unesco celebrou o “Ano Internacional da Luz”, em comemoração ao milésimo aniversário de sua publicação.

Os séculos se passaram, a roda da História girou e a Ciência no Ocidente ressurgiu, assumindo o protagonismo até o presente. Newton defendia a mesma tese de al-Haytam sobre a natureza da luz, mas é possível que nunca tenha sabido da sua existência. O holandês Christiaan Huygens, porém, tinha outro ponto de vista: a luz não seria um feixe de corpúsculos, e sim uma espécie de onda. A disputa sobre a natureza da luz

durou quase duzentos anos, sendo finalmente resolvida por Einstein, em 1905. Mas antes de seguirmos com o nosso passeio, vale a pena fazer uma pequena pausa para falar um pouco sobre o eletromagnetismo.

Eletricidade e magnetismo

Eletricidade e magnetismo são as duas faces de uma mesma moeda. Estão intimamente ligados, pois eletricidade pode gerar magnetismo, assim como magnetismo pode gerar eletricidade. Em meados do século XIX, James Maxwell previu que a luz seria o resultado da conexão entre a eletricidade e o magnetismo.

A eletricidade é um dos muitos fenômenos da Natureza cujas manifestações conseguimos entender muito bem (a teoria de Maxwell é muito precisa), e que somos capazes de manipular com maestria, mesmo sem saber o que ela de fato *é*. O problema, na verdade, está no verbo: a Física é uma forma de *representar* a Natureza baseada na observação e experimentação sistemáticas e na tradução das suas regularidades para a linguagem da Matemática. Para os físicos, é mais importante saber como um sistema físico (um átomo, por exemplo), se comporta, como evolui no tempo e em que estado estará no futuro. Não sabemos por que a carga elétrica do elétron é $1.60217663 \times 10^{-19}$ Coulombs, ou por que sua massa é $9.1093837 \times 10^{-28}$ gramas. Mas mesmo sem saber o que a eletricidade *é*, fomos capazes de criar a eletrônica, que nada mais é do que a arte de conduzir elétrons ao nosso bel-prazer. Perguntas do tipo “o que

é” tendem a jamais ter resposta.

Quase todo mundo já levou pelo menos um choque elétrico na vida. Muitos já brincaram com ímãs, sentindo com as mãos a ação de forças “invisíveis”, que ora os atraem, ora os repelem. O que chamamos de eletricidade e magnetismo são propriedades *microscópicas* da matéria que se manifestam de um modo acessível aos nossos sentidos. Existem dois tipos de *carga elétrica*, as fontes da eletricidade, que, por convenção, chamamos de carga elétrica positiva e negativa. Elétrons são *partículas carregadas*, possuem a propriedade da carga elétrica do tipo negativa. Prótons também são partículas carregadas, mas possuem carga elétrica positiva.

A presença de uma partícula carregada transforma as propriedades do espaço no seu entorno, criando o que chamamos de *campo elétrico*. Apesar de serem invisíveis, os *campos clássicos* estão por toda parte, são reais, contêm energia. Um campo clássico é o efeito combinado de *zilhões* de componentes microscópicas. Mas quando vamos tratar as partículas subatômicas, precisamos da *Teoria Quântica de Campos* (assunto para outra oportunidade). Os campos nos ajudam a entender como um corpo pode influenciar outro sem que haja contato entre eles, o que na Física chamamos de *ação à distância*.

Podemos apenas imaginar como são os campos, esse conceito central na Física. Pense em um imenso lençol, feito de um tecido muito fino e esticado na horizontal. No lençol, estão marcados dois pontos, A e B, distantes

entre si. Na posição do ponto A, um movimento brusco para cima e para baixo faz surgir uma ondulação, que se propaga pelo tecido até atingir o ponto B, que então sente os efeitos da perturbação no ponto A. O tecido pode ser tão fino quanto queiramos, até mesmo se tornar invisível, sem, no entanto, perder suas propriedades elásticas. O campo elétrico é uma espécie de “tecido invisível” que preenche todo o espaço tri-dimensional em que vivemos.

Pense agora na gravidade. Como o Sol pode fazer a Terra orbitar ao seu redor? Como a Terra pode determinar o movimento da Lua? Na Física de Newton, a gravidade é uma ação à distância de natureza obscura. O próprio Newton sempre se esquivou de explicar como a força que sua teoria prevê seria transmitida de um corpo a outro. Mesmo assim, ainda hoje a teoria de Newton é utilizada na Astronomia e nas missões espaciais, pois na escala do Sistema Solar ela é muito precisa.

Na teoria de Newton, a gravidade não é só uma ação à distância, é também uma ação *instantânea*, e isso é um grande problema, pois nada se propaga mais rápido que a luz no vácuo. A luz do Sol, por exemplo, leva cerca de oito minutos para chegar à Terra. Isso significa que se ocorresse um cataclismo no Sol, só saberíamos oito minutos depois. Mas na teoria de Newton, perceberíamos o cataclismo instantaneamente. A informação se propagaria com velocidade infinita.

Einstein resolveu essas questões no início do século passado, quando criou a sua teoria mais conhecida,

a Teoria da Relatividade Geral, a moderna teoria da gravitação: corpos muito massivos, como planetas e estrelas, alteram as propriedades do espaço ao seu redor. Mas isso é outra história.

Cargas elétricas também alteram as propriedades do espaço ao seu redor, criando *campos elétricos*. Imagine um elétron em uma determinada região do espaço. A sua presença cria um campo elétrico no seu entorno. Se um segundo elétron for colocado a uma certa distância do primeiro, cada um sentirá a força exercida pelo outro, cuja intensidade depende da distância entre eles. Quanto mais longe entre si estiverem, mais fraco será o efeito mútuo.

A força entre dois elétrons (ou entre dois prótons), é repulsiva, pois ambos têm carga elétrica do mesmo tipo. Se um próton for colocado próximo ao elétron, a força elétrica entre eles será atrativa. O campo elétrico é uma grandeza vetorial, ou seja, em cada ponto do espaço ele é definido por um vetor, com intensidade (módulo do vetor) e direção.

O campo elétrico de partículas carregadas e em repouso está ilustrado na Fig.2. As setas representam o vetor força que a carga no centro exerceria sobre uma segunda carga. Note que a intensidade da força, representada pelo tamanho das setas, diminui rapidamente à medida que a distância entre as cargas aumenta. Na teoria Maxwell, as cargas elétricas são as *fontes* dos campos elétricos. Quanto maior for a quantidade de carga elétrica que um corpo possui (excesso de elétrons sobre prótons e vice-versa), maior será a intensidade

do campo elétrico que ele geraria ao seu redor. Em outras palavras, maior será a força elétrica que esse corpo exerce sobre outros corpos carregados na sua vizinhança.

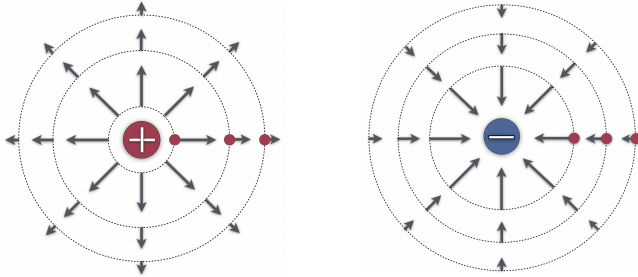


Figura 2: Cargas elétricas de mesmo tipo se repelem, e de tipos diferentes se atraem. As setas representam a intensidade e a direção do campo elétrico em função da distância. Se o corpo carregado é uma esfera, a direção do campo é radial. À medida que nos afastamos da carga, a intensidade do campo elétrico diminui rapidamente. Ao longo das linhas tracejadas, a intensidade do campo é constante.

O magnetismo é muito diferente da eletricidade. Não existe uma “carga magnética”, uma propriedade que tenha o mesmo efeito de uma carga elétrica. O campo elétrico de uma carga em repouso é radial, como os aros de uma roda de bicicleta. As linhas do campo elétrico de uma carga são sempre abertas. Já o campo magnético tem sempre dois polos. As linhas de campo de um ímã são fechadas, vão de um polo ao outro, como mostrado na Fig. 3. Por ora, vamos considerar os ímãs como sendo as fontes do campo magnético. Quando

mergulharmos no mundo microscópico, veremos que o magnetismo dos ímãs é um fenômeno quântico, de origem atômica.

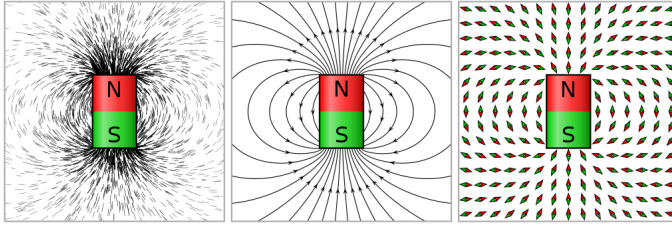


Figura 3: O campo magnético gerado por um ímã. Limalhas de ferro espalhadas ao acaso sobre uma folha de papel se alinham com o campo magnético de um ímã colocado sob a folha. As mini-bússolas mostram a direção da força magnética em cada ponto do espaço..

As Figs. 2 e 3 ilustram situações estáticas. As cargas elétricas estão em repouso relativo e a distância entre elas é fixa. O ímã está em repouso sobre uma mesa. No Universo em que vivemos, no entanto, tudo está em movimento. Então, o que acontece com os campos quando as suas fontes se movem? A resposta a essa pergunta foi dada por Michael Faraday e Andre-Marie Ampère. Ambos fizeram descobertas muito importantes durante a primeira metade do século XIX.

Correntes elétricas são exemplos de cargas em movimento: elétrons fluindo no interior de um fio condutor. Na Fig. 4, vemos uma corrente i passando dentro de um fio metálico. Ampère descobriu que o movimento de cargas dentro de um fio faz surgir um campo magnético no seu entorno. As mini bússolas indicam a direção do

campo, cujas linhas formam círculos concêntricos (uma simetria cilíndrica). Quanto mais próximo ao fio, mais intenso é o campo magnético induzido pela corrente elétrica. *Cargas elétricas em movimento geram campos magnéticos.*

Michael Faraday foi um cientista genial. Mesmo com pouca educação formal (eram outros tempos), Faraday fez descobertas muito importantes. Uma delas está ilustrada na Fig. 5: *ímãs em movimento dão origem a campos elétricos.* À medida que o ímã é movido para dentro do solenoide, o medidor registra uma corrente elétrica. A corrente muda de sentido se o ímã for retirado do solenoide. Quanto mais rápido for o movimento do ímã, mais intenso será o campo elétrico induzido. Esse é o princípio de funcionamento dos motores elétricos e das usinas hidroelétricas.

As descobertas de Ampère e de Faraday mostraram a conexão íntima entre eletricidade e magnetismo, apesar de serem fenômenos com características muito diferentes. Essa conexão é o cerne da teoria do Eletromagnetismo de James Maxwell, criada na segunda metade do século XIX. Maxwell reuniu em um único conjunto de equações uma descrição completa dos fenômenos elétricos, magnéticos e óticos. Um grande avanço científico.

Vamos elaborar um pouco mais o efeito que o movimento das fontes causam nos campos que elas geram. Imagine uma mola com uma extremidade presa à uma parede e a outra presa a um bloco, como ilustrado na

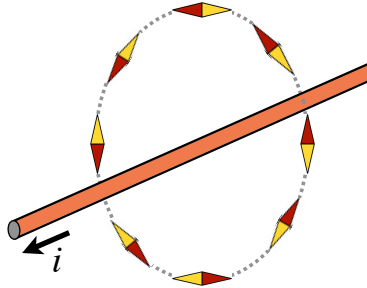
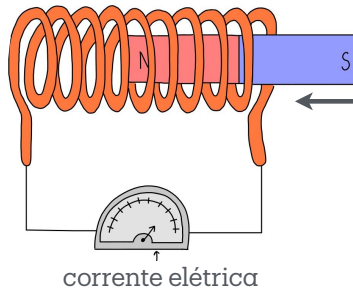


Figura 4: Quando uma corrente elétrica flui através de um fio condutor, surge um campo magnético ao seu redor. As bússolas indicam a orientação do campo magnético no entorno do fio.

parte superior da Fig. 6. O corpo está apoiado em uma superfície com atrito desprezível e está inicialmente em repouso na posição “0”. Nessa posição, a mola está relaxada, ou seja, não está nem comprimida nem esticada. O corpo então é levado até a posição “+A”, e dali ele é solto. A força elástica da mola acelera o corpo até a posição “0”. A partir desse ponto, a força da mola muda de direção, fazendo com que ele seja freado até atingir, momentaneamente, o repouso na posição “-A”. Como não há atrito, o corpo é empurrado novamente pela mola, acelerado até o ponto “0” e freado até o ponto “+A”. Em um mundo hipotético sem atrito, o movimento de vai-e-vem do corpo seguiria indefinidamente. Esse é o chamado movimento harmônico simples.



www.thesciencehive.co.uk/electromagnetic-induction-gcse

Figura 5: *Uma corrente elétrica surge à medida que o ímã é movido para dentro do solenoide, e flui na direção oposta à medida que o ímã é retirado. Correntes elétricas só ocorrem quando há um campo elétrico no interior do fio.*

Ondas

Ondas são uma sucessão de vales e cristas. São caracterizadas por duas quantidades: *amplitude e frequência*. A amplitude está ligada à intensidade, ou seja, à energia transportada. É a característica que diferencia uma marola de um vagalhão. Frequência é o número de repetições por unidade de tempo, ou seja, quantas cristas passam por determinada posição em certo período de tempo. Em vez da frequência, podemos usar o *comprimento de onda*, pois as duas grandezas são diretamente relacionadas: o comprimento de onda, λ , dividido pela frequência, f , é igual à velocidade com que a onda se propaga, $v = \lambda/f$.

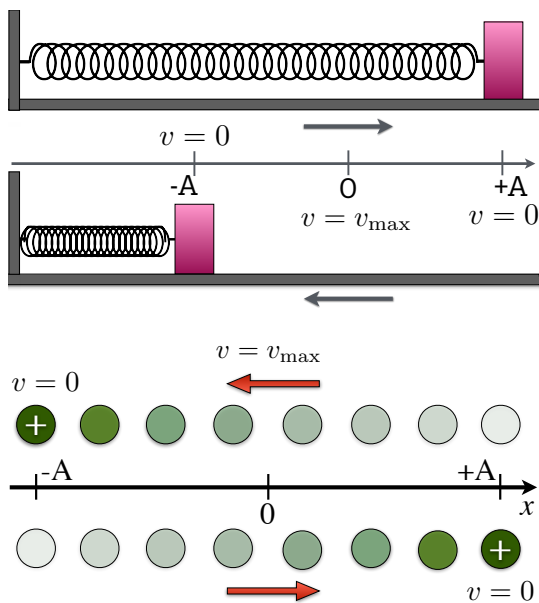


Figura 6: *Oscilações harmônicas.* Na parte superior, o corpo é empurrado pela mola do ponto $-A$ até o ponto 0 , posição em que a mola está relaxada e a sua velocidade é máxima. A partir de então, a mola começa a frear o corpo até atingir o ponto $+A$. Ignorando atritos, o corpo executa o movimento na direção oposta até o ponto $-A$, onde sua velocidade é nula novamente. O movimento de vai-e-vem entre os pontos $-A$ e $+A$ se repete indefinidamente. Na parte inferior, uma carga elétrica executa o mesmo movimento oscilatório, causando perturbações no seu campo elétrico que se repete regularmente, como as ondas de um lago.

Vamos agora substituir o corpo da Fig. 6 por uma esfera carregada eletricamente, executando o mesmo movimento harmônico de vai-e-vem. O movimento oscilatório da esfera carregada gera um campo magnético,

como acabamos de ver. Suponha que a oscilação completa da carga em torno do ponto 0 ($-A \rightarrow 0 \rightarrow +A \rightarrow 0 \rightarrow -A$), ocorra sempre no mesmo ritmo, ou seja, que a carga elétrica oscile em torno do ponto 0 com uma frequência constante. Nesse caso, que acontece com os campos? A resposta é um efeito espetacular.

Imagine um lago de águas tranquilas, em um dia sem vento. Se pedrinhas forem lançadas sobre a superfície do lago, uma de cada vez, sempre no mesmo ponto e no mesmo ritmo, surgirá uma sequência de ondulações circulares que se repetem regularmente, como ilustrado na Fig. 7. O efeito do movimento oscilatório da carga elétrica é semelhante: ondulações no campo elétrico se propagarão pelo espaço, formando uma sequência de ondas com a mesma frequência com que a partícula carregada oscila.

Um observador mede a intensidade do campo elétrico em uma determinada posição. Ele vê a intensidade variar entre um valor máximo e mínimo, à medida que as ondulações passam pela posição onde ele está (Fig. 8). Ele mede também o campo magnético, e observa o mesmo comportamento. E aqui temos o ponto crucial: os campos elétrico e magnético oscilam de forma *sincronizada, sempre em planos perpendiculares entre si, e ambos são sempre perpendiculares à direção em que a perturbação se propaga*. Se o campo elétrico oscila em um plano vertical, o campo magnético oscila na direção horizontal.

A oscilação do campo elétrico gera um campo magnético que oscila com a mesma frequência. A os-

cilação de um alimenta a oscilação do outro. Se não há obstáculos, as ondulações nos campos se propagam pelo espaço de forma autossustentada: uma *onda eletromagnética*. Esse é o efeito espetacular, ilustrado na Fig. 9.



Figura 7: *Ondas circulares na superfície de um lago. A seqüência de picos e vales se repete regularmente quando a superfície da água é perturbada em um ritmo constante.*

Vivemos cercados de ondas eletromagnéticas por todos os lados: a luz visível, as micro-ondas e ondas de rádio da internet e dos nossos celulares, os raios-X das radiografias, os raios ultravioletas (UV) que causam danos à pele. Todas são ondas eletromagnéticas, que se diferenciam apenas pela a frequência (ou, alternativamente, pelo comprimento de onda), como mostrado na Fig. 10.

Uma fração da luz do Sol é refletida pela superfície da Terra, e a outra parte é absorvida. A energia absorvida é devolvida ao ambiente na forma de ondas

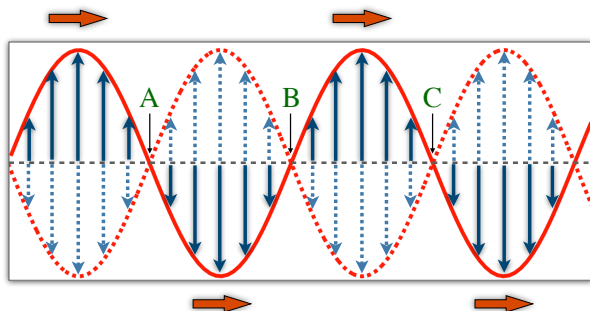
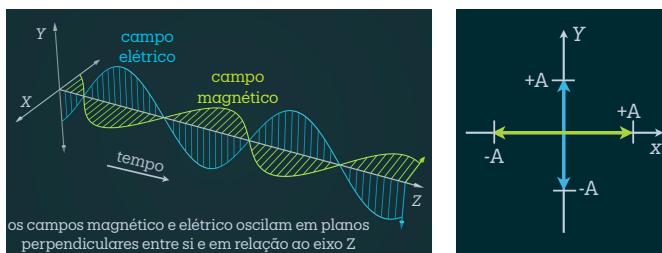


Figura 8: *Varição temporal do campo elétrico em uma onda eletromagnética. Em cada ponto, a intensidade do campo elétrico oscila na direção vertical entre os limites dados pelas linhas vermelhas (cheias e pontilhadas). Nos pontos A, B e C, o campo elétrico é sempre nulo. O campo magnético oscila da mesma forma, na direção horizontal.*

eletromagnéticas com comprimentos de onda na faixa do infravermelho, que não conseguem escapar para o espaço sideral. A radiação infravermelha fica aprisionada na atmosfera pelas moléculas de CO_2 e de outros gases do efeito estufa. O aprisionamento da radiação infravermelha não é ruim em si, pois é um efeito que possibilita a existência da vida. Mas o excesso de CO_2 lançado na atmosfera contribui para o aumento na temperatura do planeta, com suas gravíssimas consequências.

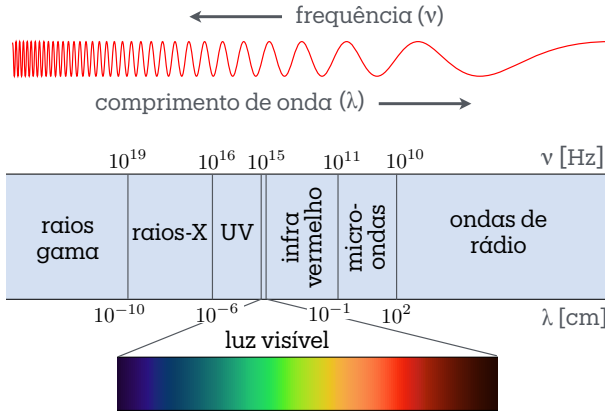
Difração e interferência são fenômenos comuns a todos os tipos de ondas. A difração ocorre quando ondas incidem sobre um anteparo no qual há uma pequena fenda, como ilustrado na Fig. 11. Do outro lado do anteparo, surgem ondas circulares, *difratadas*. Se o an-



<https://famousandfaded.com/showcase/electromagnetic-wave-3d-animation/>

Figura 9: Representação de uma onda eletromagnética, mostrando a propagação da componente elétrica, na vertical, e da magnética na horizontal. Em cada ponto do espaço, os campos oscilam entre as amplitudes $-A$ e $+A$. As oscilações são sincronizadas: quando o campo elétrico é máximo, o campo magnético também é, quando o campo elétrico é nulo, o campo magnético também é.

teparo tem duas fendas, duas ondas circulares surgirão. Depois do anteparo, as ondas se propagam pela mesma região do espaço e se superpõem. Pode então haver uma *interferência construtiva*, quando as ondas se somam, resultando em uma onda com maior amplitude, ou uma *interferência destrutiva*, quando as ondas se anulam, parcial ou totalmente. Tudo depende de as ondas estarem *em fase* ou *defasadas*. Dois casos extremos de superposição de duas ondas estão mostrados na Fig. 12. Nas ondas em fase, o máximo de uma está em sincronia com o máximo da outra, e a amplitude da onda resultante é a soma das amplitudes de cada uma. No outro extremo, vemos o que acontece quando



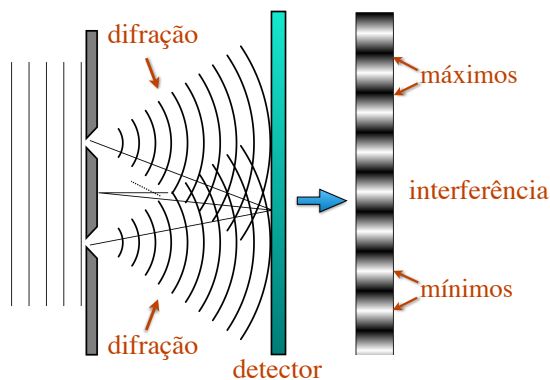
1 Hertz (Hz) = uma oscilação completa por segundo

Figura 10: O espectro eletromagnético. Nossos olhos são sensíveis a uma pequena região do espectro..

o máximo de uma onda está sincronizado com o mínimo da outra. Nesse caso, as amplitudes se anulam.

Os fenômenos ondulatórios – difração, interferência, refração e reflexão – têm uma característica fascinante: são *universais*, isto é, *todos* os tipos de ondas obedecem ao mesmo tipo de equações, as chamadas equações de onda. Um exemplo está mostrado na Fig. 13. O Estreito de Gibraltar é uma pequena abertura que separa o Oceano Atlântico do Mar Mediterrâneo e a Europa da África. Na imagem feita por satélite, vemos ondulações com grandes comprimentos de onda vindas do Atlântico sofrerem difração ao passar pelo Estreito. A situação, nesse caso, é um pouco mais complexa, pois como o Estreito tem uma extensão acidentada, ondas difratadas surgem em regiões distintas. Essas ondas se

superpõem causando as interferências que podemos ver no canto inferior direito da imagem.



https://en.wikipedia.org/wiki/Double-slit_experiment#/media/File:Doubleslit.svg

Figura 11: *Difração e interferência são fenômenos ondulatórios, conhecidos há mais de 200 anos. O encontro de duas ondas quaisquer resulta em interferência: as ondas se somam ou se subtraem, formando uma sequência de máximos e mínimos.*

Em resumo, o fato de sofrer difração e interferência foi uma forte indicação de que a luz é um tipo de onda. As ondas eletromagnéticas, previstas pela teoria de Maxwell, foram detectadas pela primeira vez no final do século XIX. O debate sobre a natureza da luz parecia encerrado: a luz consiste em ondas eletromagnéticas, ponto final. A descoberta das ondas eletromagnéticas confirmou uma grande unificação na Física: o magnetismo, a eletricidade e a ótica são manifestações diferentes de uma mesma coisa, o campo eletromagnético!

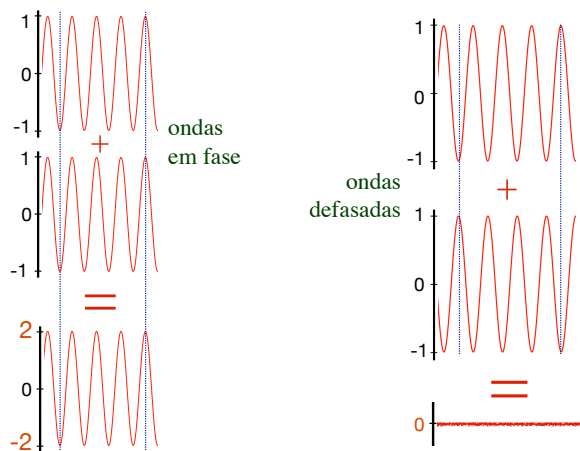


Figura 12: Quando ondas se propagam numa mesma região do espaço, elas se superpõem e ocorre o fenômeno da interferência. As amplitudes de cada onda podem se somar ou subtrair.

A tempestade se aproxima

Todas as coisas que vemos na Terra e no céu são feitas com apenas uns poucos constituintes fundamentais, as chamadas *partículas elementares*. São as pechinhas de lego que compõem a matéria. Falaremos um pouco sobre elas no último capítulo. A Física procura entender como as partículas elementares interagem umas com as outras, e como se organizam para formar estruturas mais complexas, como prótons e nêutrons. As partículas elementares são chamadas assim porque com a tecnologia atual não podemos medir seus tamanhos, não sabemos dizer se elas têm ou não uma estrutura interna. Esse é o sentido do termo

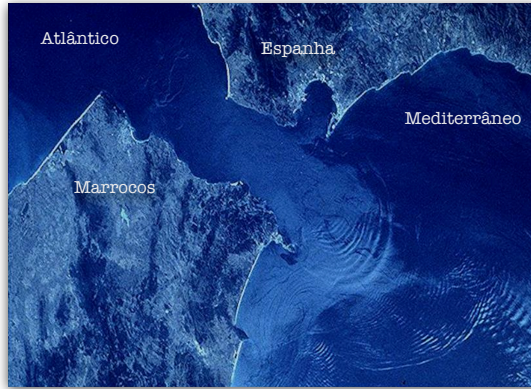


Figura 13: *Difração e interferência entre ondas do mar.*

“elementar”, aquilo que não é feito de coisas ainda menores. Não sabemos o que vamos encontrar “dentro” do hoje consideramos partículas elementares quando pudermos estudar a Natureza em escalas menores que $0,000.000.000.000.001$ m, o nosso limite atual.

A observação sistemática da Natureza revela regularidades, que a Física traduz em leis. A lei da Gravitação de Newton é um bom exemplo. Algumas regularidades são observadas: a força da gravidade é sempre atrativa; a intensidade da atração entre dois corpos depende de suas massas, m e M (quanto maiores forem as massas, maior será a atração gravitacional); a força de atração gravitacional depende também da distância d entre os corpos (quanto mais longe estiverem um do outro, menor será a atração gravitacional); a intensidade da

atração não depende do material de que são feitos os corpos. A Física traduz esses fatos em uma equação simples,

$$F = G \frac{mM}{d^2}.$$

O denominador da fração mostra como a intensidade da força da gravidade varia com a distância. A constante G é universal, vale para todos os corpos, e representa o fato de a intensidade da força F de atração gravitacional entre dois corpos de massas m e M , a uma distância d um do outro, não depender da substância de que eles são feitos. Não se sabe porque o valor da constante G é $6,67408 \times 10^{-11} \text{Nm}^2/\text{kg}^2$, mas usando as leis de Newton, o planeta Netuno foi descoberto, estivemos presentes na Lua, em um futuro próximo estaremos em Marte e uma nave pousou recentemente em um asteroide para colher material.

A descoberta do planeta Netuno, em 1846, é um episódio emblemático. Havia uma pequena anomalia na órbita de Urano, o planeta mais externo conhecido na época. Admitindo que a lei da gravitação de Newton fosse correta, a anomalia só seria explicada se existisse um outro planeta ainda mais externo que Urano. Cálculos baseados na Teoria da Gravitação de Newton, feitos pelo astrônomo francês Urbain Le Verrier, indicaram a órbita que deveria ter o suposto planeta. Os cálculos foram enviados a um observatório em Berlim, na Alemanha. Quando os telescópios foram apontados para a direção prevista, lá estava Netuno, à espera de ser descoberto.

No final do século XIX, era comum entre os cientistas a ideia de que não havia mais nada de relevante a ser descoberto na Física. A Mecânica de Newton, o Eletromagnetismo de Maxwell e a Termodinâmica explicavam praticamente todos os fenômenos conhecidos. A Física apresentava um mundo ordenado e previsível, em que tudo parecia se encaixar. Mas tratava-se apenas da calma que precede as tempestades. Antes que as luzes dos anos 1800 apagassem, a grande crise começou. Num intervalo de poucos anos, foram descobertos os raios-X (1895), a radioatividade (1896) e o elétron (1897). Eram novidades que simplesmente não encontravam lugar na moldura da Física conhecida.

Mas não era só isso, havia também alguns problemas incômodos. Reproduzir teoricamente o *espectro da radiação de corpo negro* era um problema sem resposta, que não podia ser explicado pelas leis do Eletromagnetismo e da Termodinâmica. Outro problema sem solução era o *efeito fotoelétrico*, com o qual convivemos rotineiramente quando usamos elevadores modernos, ou consumimos energia gerada por placas solares. Simplesmente não podem ser explicados pelas leis do Eletromagnetismo. A solução desses dois enigmas deu início à revolução quântica.

O corpo negro

Todo corpo emite radiação térmica, uma forma de energia que consiste em um conjunto de ondas eletromagnéticas com uma infinidade de frequências. A

radiação térmica é o que comumente chamamos de *calor*. Cada onda, dependendo da sua frequência, transporta uma fração da energia total irradiada pelo corpo. O tom avermelhado de uma barra de ferro em brasa se explica porque as frequências dominantes da radiação térmica desse corpo, aquelas que carregam a maior fração da energia irradiada, são as da luz na faixa do vermelho.

Uma característica notável da radiação térmica é que o *espectro* (a forma como a energia irradiada é distribuída entre as ondas de diferentes frequências) depende basicamente da temperatura do corpo, como mostra a Fig. 15. A forma do corpo, sua cor, tamanho ou o material de que é feito não têm muita influência. Visando a uma lei universal, os físicos criaram o conceito de *corpo negro*: um objeto totalmente opaco, capaz de absorver toda a radiação eletromagnética incidente; nenhuma luz o atravessa ou é refletida. Trata-se, naturalmente, de uma idealização útil, pois nenhum objeto com essas propriedades existe na vida real. Os fenômenos da Natureza são, em geral, complexos demais para que se possa fazer um modelo matemático completo e detalhado. Por isso, os físicos se valem de simplificações e aproximações para que os problemas possam ser tratáveis.

O corpo negro, portanto, é um objeto que emite radiação térmica cujo espectro depende *exclusivamente* da sua temperatura. Um modelo matemático que reproduz o espectro do corpo negro em qualquer temperatura torna-se uma lei universal. Encontrar tal modelo era

um problema sem solução. Até o ano de 1900.

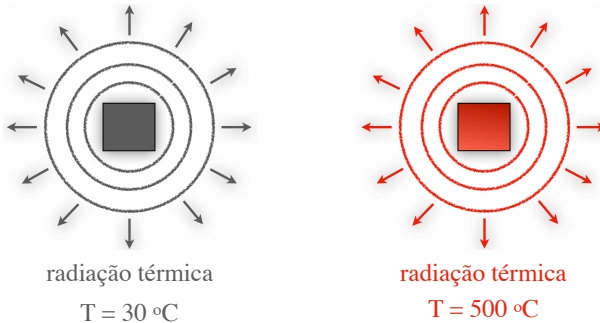


Figura 14: *Todo corpo emite radiação (ondas eletromagnéticas) térmica. A frequência (cor) dominante depende da temperatura do corpo. No ferro em brasa, a frequência dominante é a da luz vermelha.*

O físico alemão Max Planck se debruçou sobre esse problema durante anos, até finalmente encontrar a sua solução. No dia 14 de novembro, em Berlim, Planck saiu de casa e tomou o rumo da Universidade de Berlim, como fazia habitualmente. Naquele dia haveria uma reunião da Sociedade Alemã de Física, onde ele iria apresentar a tão esperada solução do problema. Planck mostraria que o espectro do corpo negro não poderia ser explicado pelas leis da Física conhecidas. Algo novo era necessário.

O espectro do corpo negro pode ser estudado usando uma espécie de forno, isolado termicamente do exterior. Um exemplar moderno está mostrado na Fig. 16. Quando o interior do forno é aquecido, as ondas eletro-

magnéticas são absorvidas continuamente pelas suas paredes internas. As ondas são devolvidas, em seguida, ao volume interior do forno com as mesmas frequências das ondas absorvidas. A troca contínua de energia entre a matéria e a radiação leva o interior do forno a um estado de *equilíbrio térmico* (mesma temperatura em qualquer parte).

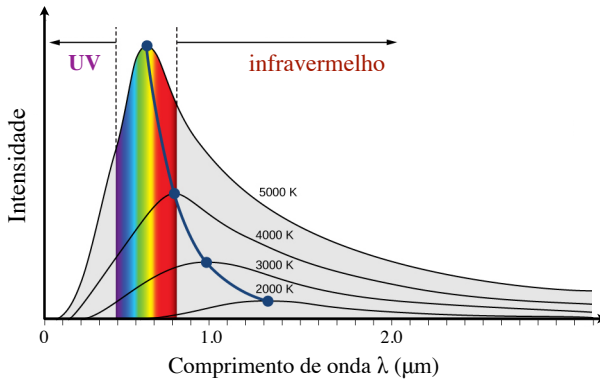


Figura 15: *Espectro da radiação de corpo negro. A forma do espectro muda com a temperatura. Durante a pandemia da Covid, quase todos nós tivemos um termômetro digital apontado para a nossa testa. A temperatura do corpo é corresponde ao valor máximo do espectro.*

O forno pode ser aquecido em qualquer temperatura desejada. Uma pequena abertura permite que uma amostra da radiação térmica contida no interior possa escapar e ser analisada. Com esse dispositivo, é possível determinar o espectro do corpo negro para diferentes valores da sua temperatura. O equipamento é relativamente simples, mas o desafio tecnológico na época era medir com precisão a intensidade da radiação

ao longo de todo o espectro de frequências.

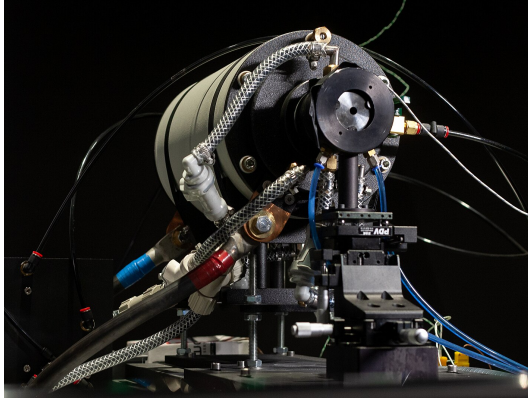


Figura 16: Forno utilizado no laboratório CARLO, na Polônia. detector de ondas eletromagnéticas está acoplado à saída do forno
Crédito: <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Luminforum>.

Estamos acostumados a coisas *contínuas*. Visto sem aparelhos, o arco-íris parece uma sequência de tons infinitamente próximos, indo do vermelho ao violeta (cada tom corresponde a uma onda com frequência bem definida). Em termos mais técnicos, o arco-íris parece formar um espectro *contínuo* de cores. A continuidade, entretanto, é apenas uma ilusão dos nossos sentidos. Quando visto bem de perto, algumas linhas pretas aparecem entre as cores do arco-íris. A *descontinuidade*, perceptível apenas quando a observação é feita em escalas adequadas, é uma das marcas do mundo microscópico. Essa, em essência, foi a descoberta de Planck.

Planck encontrou a solução do problema, mas não

gostou do resultado. Numa época em que ainda se duvidava da existência dos átomos, Planck deu um passo ousado. Ele imaginou que as paredes internas do forno fossem constituídas por osciladores harmônicos microscópicos, como os da Fig. 6. Cada oscilador vibraria com uma frequência diferente, e só poderia absorver e emitir radiação que tivesse a mesma frequência da sua oscilação.

Planck era um homem conservador, e esperava que a Física conhecida fosse suficiente para resolver o problema. Dentro do forno, as ondas eletromagnéticas deveriam formar um contínuo de frequências, uma espécie de arco-íris, só que com frequências que se estendem para muito além e muito aquém do curto intervalo que nossos olhos detectam.

Para sua surpresa e perplexidade, Planck constatou que ele só conseguiria resolver o problema admitindo uma hipótese que contrariava as suas convicções mais profundas: a energia trocada entre matéria (os osciladores) e radiação (as ondas eletromagnéticas) só pode ter determinados valores, “pacotes” individuais que são múltiplos inteiros de uma quantidade mínima, que corresponde ao menor valor possível de energia dos osciladores. Assim surgiu o *quantum*.

Planck não tinha uma explicação satisfatória para a sua hipótese, que considerou como um “ato de desespero”, sem muitas consequências. Mas não era uma hipótese esdrúxula. Somente depois de algum tempo Planck se daria conta de que, diante dele, estava a primeira manifestação da granularidade do mundo

quântico. Podemos dizer que no dia 14 de novembro de 1900, teve início a revolução quântica.

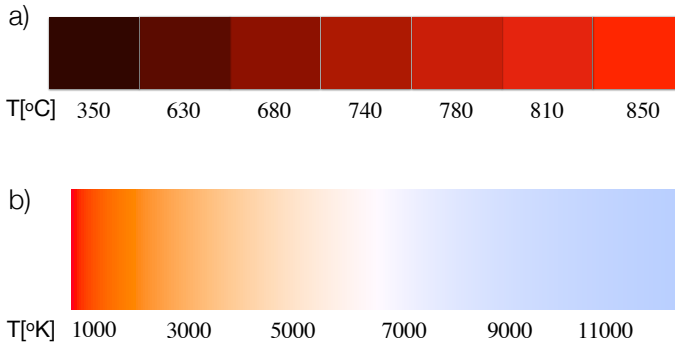


Figura 17: a) *Varição da tonalidade de uma barra de ferro aquecida em função da temperatura. O tom avermelhado corresponde às frequências da radiação com maior intensidade.* b) *espectro de cores de estrelas em função da temperatura da superfície. A temperatura na superfície do Sol é de cerca de 5500 °C. Estrelas maiores e mais quentes têm luz azulada.*

Crédito:<https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Bhutajata>.

Einstein

Einstein é seguramente o cientista mais conhecido, talvez o mais genial de todos os tempos. Sua imagem com a língua de fora e os cabelos desgrenhados tornou-se um ícone pop da Ciência. O que talvez nem todos saibam é que Einstein não ganhou o Prêmio Nobel pela sua Teoria da Relatividade, e sim pelos seus estudos

sobre o efeito fotoelétrico, fundamentais para a criação da teoria quântica da matéria e energia.

Na Universidade de Zurique, Einstein era considerado um aluno “encrenqueiro”. Ele não tolerava quaisquer formas de autoritarismo, e por isso se indispôs com muitos dos seus professores. Pagou um preço alto pela sua “rebeldia”: depois de se formar, não conseguiu emprego em nenhuma universidade. Desempregado, passou por dificuldades, sobrevivendo com uma mesada do pai e dando aulas particulares.

Sua situação melhorou graças ao pai de Marcel Grossmann, um amigo que viria a ter um papel importante no seu trabalho mais conhecido, a Teoria da Relatividade Geral. O pai de Marcel conseguiu para Einstein uma posição no escritório de patentes da cidade de Berna, na Suíça. Assim, até 1905, o maior cientista do século XX era um mero funcionário burocrata.

No escritório de patentes, Einstein encontrou o que mais precisava: tempo e tranquilidade para pensar sobre os diversos temas da Física que o interessavam. Então, em 1905, aos 26 anos de idade, viveu o seu “ano milagroso”. Em um espaço de poucos meses, Einstein publicou uma série de trabalhos que lançaram as bases da Física Moderna.

Em um desses trabalhos, Einstein tratou do efeito fotoelétrico, um fenômeno quântico que faz parte do nosso cotidiano, mesmo que não notemos. É o princípio de funcionamento dos painéis solares e do mecanismo que controla o fechamento das portas dos elevadores mais

modernos. O efeito fotoelétrico consiste em elétrons que são expelidos da superfície de um metal quando esta é iluminada por luz de frequência suficientemente alta. Um eletrodo próximo atrai os elétrons liberados, formando uma corrente elétrica. Em uma descrição microscópica, os átomos das camadas superficiais do metal absorvem a energia da luz e, na sequência, elétrons desses átomos são expelidos, como é ilustrado na Fig. 18.

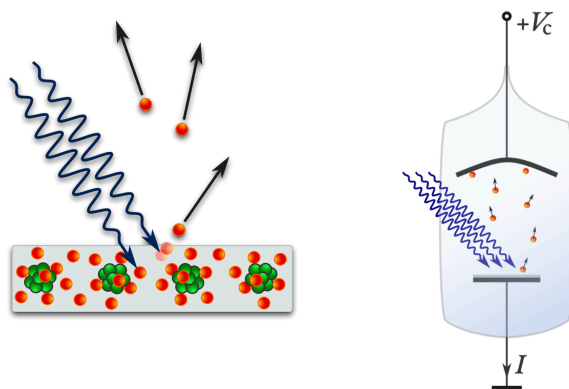


Figura 18: No efeito fotoelétrico, a luz se comporta como um feixe de minúsculas partículas de energia, imateriais. Colidem individualmente com os átomos, expulsando um de seus elétrons. Os elétrons podem ser atraídos por um eletrodo, gerando uma corrente elétrica.

O efeito fotoelétrico é conhecido desde o século XIX, mas era um problema incômodo porque não podia ser explicado pelas leis do Eletromagnetismo. Feixes de luz mais intensos (ondas eletromagnéticas de maior amplitude), segundo a Física conhecida, deveriam transferir

mais energia aos átomos da camada superficial. Deveríamos, assim, observar elétrons expelidos com mais energia (maior velocidade) se intensidade da luz incidente sobre o metal aumentasse.

Mas, para a perplexidade dos físicos da época, não é isso o que se observa. Feixes de luz mais intensos produzem apenas correntes maiores – mais elétrons ejetados, mas *todos com a mesma energia*. A amplitude da onda luminosa não afeta a energia dos elétrons ejetados. Eles só se tornam mais rápidos quando a *frequência* da luz aumenta. Esse comportamento era um enigma.

Em 1905, no seu ano mágico, jorravam ideias revolucionárias da mente de Einstein. Uma dessas ideias resolveu o problema do efeito fotoelétrico: ele é perfeitamente explicado admitindo que, em vez de uma onda eletromagnética, a luz é um feixe de “corpúsculos” imateriais, ínfimos pacotes individuais de energia pura, os *quanta* (plural de *quantum*) de luz, posteriormente batizados de *fótons*. É muito provável que Einstein não tivesse conhecimento do que Ibn al-Haytam havia proposto no seu fabuloso *Livro de Óptica*, 900 anos antes, o que reforça a genialidade do cientista árabe.

Na teoria de Einstein, *a energia dos fótons é proporcional à frequência da luz*. Fótons de feixes luminosos de alta frequência têm mais energia do que os de um feixe de luz de baixa frequência. Já a intensidade do feixe depende apenas do *número de fótons*. Comparando dois feixes luminosos de mesma frequência, os mais intensos têm mais fótons do que menos intensos. Assim,

fica explicado porque o aumento da frequência implica elétrons mais rápidos, pois mais energia é transferida nas colisões dos fótons com os átomos.

Planck havia descoberto que seus “osciladores” (as moléculas das paredes internas do forno) só poderiam *trocar* energia com a radiação em pequenos pacotes, múltiplos inteiros de uma quantidade mínima, $E = hf$, onde f é a frequência da radiação e h é a *constante de Planck*, a constante que rege o mundo quântico. Einstein foi além, mostrando que a *própria radiação* consiste em ínfimos pacotes individuais de pura energia. A energia de cada fóton é $E = hf$, não por acaso, a mesma fórmula de Planck. No interior do forno, a radiação é um “gás de partículas de luz”.

Fótons

A Copa do Mundo de 1986, no México, foi espetacular. Merecidamente vencida pela Argentina, o torneio ficou marcado por dois personagens: o genial Maradona e o seu gol de mão contra a Inglaterra, que poucos anos antes havia imposto uma derrota humilhante à Argentina na guerra das Malvinas; e a torcida mexicana, que apresentou a “ola” ao mundo.

Imagine um estádio de futebol lotado. Os torcedores, ansiosos, aguardam o início da partida. De repente, de uma extremidade da arquibancada surge a ola: um movimento sincronizado dos torcedores, que varre a arquibancada de ponta a ponta. Quando a ola se aproxima, cada pessoa apenas se levanta, erguendo

os braços na hora certa para, em seguida, tornar a se sentar. O efeito coletivo desse movimento simples de cada torcedor é uma onda humana se propagando pela arquibancada, muito diferente do levantar e sentar de cada indivíduo. Quando atinge a outra extremidade da arquibancada, a ola é “refletida”, isto é, volta a se propagar, agora no sentido contrário.

A ola é apenas um dos inúmeros exemplos de sistemas formados por um grande número de componentes (no caso, os torcedores) em que o comportamento coletivo resulta ser muito diferente do individual. Outro exemplo é uma chuva forte. Vista de muito longe, a chuva parece uma massa contínua de água, que se move como se fosse um corpo único. Não é possível distinguir as gotas. O que parece ser contínuo de longe, é discreto quando visto de perto.

Com um feixe luminoso acontece algo parecido, como uma “ola de luz”. O comportamento *coletivo* de um número imensamente grande de fótons pode ser o de uma onda, que sofre difração e interferência. Entretanto, como veremos a seguir, um único fóton pode se comportar ora como uma onda, ora como um feixe de corpúsculos. Tudo depende das circunstâncias. Mas não podemos dizer que a luz tem uma natureza dupla, pois a luz não é nem um nem outro. Ondas e corpúsculos são conceitos do nosso mundo macroscópico. A luz é um feixe de fótons.

Podemos resumir da seguinte forma o que vimos sobre a natureza da luz: fótons são os *quanta* de luz. Não sabemos o que eles *são*, mas sabemos muito bem

como se *comportam* nas mais diversas situações, e assim podemos fazer muitas coisas com eles.

“Todos esses anos de intensa reflexão não me aproximaram da resposta à pergunta: o que são os quanta de luz? Claro, hoje qualquer idiota acha que sabe a resposta, mas está apenas se enganando”.

Albert Einstein

2 - Onda ou partícula?

Em 1923, o estadunidense Arthur Compton entrou para a história da Física ao fazer a comprovação experimental de que a luz, além de se comportar como uma onda, sofrendo difração e interferência, pode também se comportar como um feixe de partículas imateriais: os fótons, partículas sem massa de repouso, minúsculos pacotes individuais de pura energia. Como Einstein previra em 1905.

No mesmo ano em que Compton comprovou que os fótons realmente existem, um jovem aristocrata francês, Louis de Broglie, apresentou sua tese de doutorado. Nela, havia uma hipótese que a princípio pareceu absurda: a alternância no comportamento, ora onda, ora partícula, não é uma exclusividade da luz, é uma propriedade de *qualquer partícula subatômica*, como elétrons e prótons.

Ao propor que partículas materiais (com massa) poderiam se comportar também como ondas, as “ondas de matéria”, de Broglie associou uma grandeza típica de uma partícula, o momento linear p , a uma grandeza típica de ondas, o comprimento de onda λ . Na fórmula de de Broglie, o momento linear de uma partícula é dado por $p = h\lambda$, onde h é a sempre presente constante de Planck.

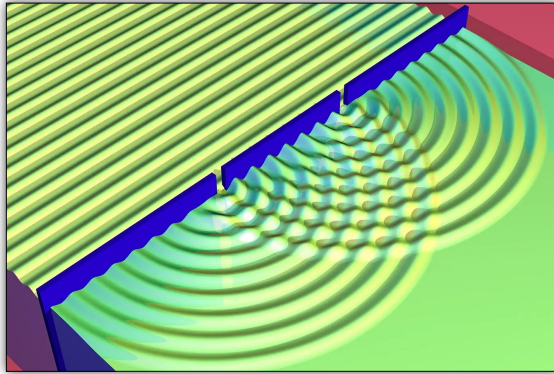
Poucos anos depois, alguns experimentos comprovaram que a ideia “absurda” de de Broglie estava correta. Feixes de partículas materiais, como elétrons e prótons,

também podem sofrer difração e interferência! Assim como o que ocorre com a luz, tudo depende das circunstâncias. Partículas materiais sofrendo difração e interferência são fenômenos muito bizarros. Mas assim é o microcosmo. O comportamento ambíguo das partículas subatômicas, ora onda, ora partícula, comum a fótons e elétrons (ou prótons, íons, ou quaisquer outras partículas com massa), é uma das características mais marcantes do mundo microscópico.

Um exemplo que ilustra muito bem o quão estranho é o mundo quântico é o chamado experimento da *dupla fenda*, mostrado na Fig. 19. Um feixe luminoso incide sobre um anteparo onde há duas pequenas aberturas. Se o tamanho das aberturas é apenas um pouco maior do que o comprimento de onda da luz incidente, do outro lado do anteparo surgem ondas circulares. As ondas se superpõem e interferem. Um detector (um filme fotográfico, por exemplo) instalado após o anteparo registra o impacto da luz. No detector, vemos uma sequência de regiões claras, onde muitos fótons incidiram, entremeadas por regiões escuras, onde nenhuma luz foi detectada (Fig. 11).

O que eu acabo de descrever não ocorre apenas com a luz, acontece com *qualquer* tipo de onda. Vimos na Fig. 13 fotografia tirada por satélite que registra o mesmo efeito com ondas oceânicas. O que acontece se no experimento da dupla fenda substituirmos a luz por um feixe de partículas com massa, como elétrons ou prótons?

Na Fig. 20, vemos o que ocorre quando objetos



Russel Kightley/Science Photo Library

Figura 19: *O experimento da dupla fenda. Ondas planas (frentes de onda retilíneas) incidindo sobre um anteparo com duas fendas de dimensões comparáveis ao comprimento das ondas incidentes, tornam-se ondas circulares após passarem pelas aberturas. Esse é o fenômeno da difração. As ondas circulares se sobrepõem, causando interferência. Difração e interferência são fenômenos típicos de ondas.*

macroscópicos, como bolas de bilhar, atravessam um anteparo com duas fendas. A abertura das fendas é apenas um pouco maior que o diâmetro de cada bola. Cada uma segue em linha reta, com uma trajetória bem definida. Como era de se esperar, apenas as bolas que seguem na direção das fendas conseguem atravessar o anteparo. Ao colidir com um detector colocado após o anteparo, cada bola deixa uma marca bem definida. Vemos, então, duas regiões onde se concentram as marcas, alinhadas com as trajetórias de cada bola. Nada de novo até aqui.

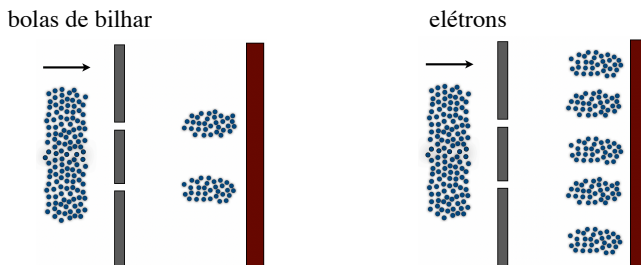


Figura 20: *O experimento da dupla fenda com objetos massivos macroscópicos e microscópicos. Objetos quânticos, como elétrons, se comportam como ondas.*

Mas se o experimento é repetido, substituindo as bolas de bilhar por um feixe de elétrons, e com fendas proporcionalmente microscópicas, algo inteiramente diferente e inesperado acontece. Cada elétron deixa uma marca bem definida ao atingir o detector. Mas ao contrário do que acontece com as bolas de bilhar, no detector surge uma sequência de regiões com uma grande concentração de marcas, intercaladas por outras quase sem nenhuma. Exatamente como acontece com a luz! Nesse experimento, elétrons e fótons se comportam da mesma maneira, como se ambos tivessem a mesma natureza. O fato de elétrons terem massa e os fótons não, é simplesmente irrelevante!

Um feixe de partículas pode se comportar como um feixe luminoso, assim como um raio de luz pode se comportar como um feixe de partículas. O que deter-

mina cada tipo de comportamento são as circunstâncias em que fótons e elétrons interagem com o seu entorno. Esses fatos são bem estabelecidos, verificados experimentalmente inúmeras vezes ao longo dos últimos 100 anos. Seja na dupla fenda ou em outras ocasiões, os elétrons não ondas que se transformam em partículas, ou vice-versa. Tampouco se dividem ao meio. Fragmentos de elétrons, com metade da sua carga elétrica nunca foram observados.

Seria a ambiguidade onda-partícula um efeito puramente estatístico, uma vez que em um feixe há um número astronômico de partículas? A resposta é não. Nos experimentos de dupla fenda modernos, é possível enviar um elétron por vez. Depois de algum tempo, quando muitos e muitos elétrons ou fótons foram lançados, um após o outro, no detector atrás do anteparo observamos o mesmo padrão de interferência. Experimentos semelhantes foram repetidos inúmeras vezes e de várias formas, sempre com o mesmo resultado.

O mais surpreendente, no entanto, vem agora. Vamos fazer uma variação no experimento, colocando um dispositivo na fenda A que emite um sinal sempre que um elétron a atravessa. Agora, passamos a ter a informação sobre o caminho que cada elétron segue. Se o dispositivo produz um sinal, sabemos o elétron passou pela fenda A, caso contrário, sabemos que passou pela fenda B. Nossa informação sobre o estado quântico do elétron aumenta, pois na verdade, ao usarmos o dispositivo em uma das fendas estamos fazendo uma

medição. E nesse caso, como mágica, *a interferência desaparece!* No detector por trás do anteparo, vemos os elétrons distribuídos como se fossem minúsculas bolinhas de bilhar (Fig. 20)! Ou seja, se virarmos de costas, surge a interferência, mas se olharmos para o anteparo, a interferência desaparece! Se você acha isso muito estranho, e não entende direito o que se passa, não se preocupe, você não está sozinho. Nós, físicos, também achamos que o mundo microscópico é muito esquisito, e não o entendemos direito.

A teoria quântica descreve como os sistemas microscópicos se *comportam* em diferentes situações, como interagem uns com os outros, como evoluem no tempo, mas não se ocupa em responder à pergunta “o que *são* esses objetos”. Como eu disse acima, não sabemos o que elétrons, fótons e outras partículas elementares *são*. A MQ permite calcular com precisão os resultados dos mais variados experimentos, mas não se propõe a responder perguntas do tipo porque as propriedades das partículas, como carga, massa, *spin* etc. são o que são. O que podemos dizer com segurança sobre os elétrons é que, até onde é possível observar com a tecnologia atual, eles não possuem uma estrutura interna, ou seja, não são feitos de coisas ainda menores, e por isso são considerados *partículas elementares*. Elétrons, como qualquer partícula subatômica, se *comportam* como se fossem ondas, em algumas situações, e em outras, como se fossem corpúsculos, sem, no entanto, *serem* uma coisa ou outra.

A MQ descreve os eventos do mundo quântico com

exatidão, mas estes podem ser interpretados de maneiras diferentes. Sabemos que nenhuma partícula elementar se divide em duas (não seriam elementares se isso acontecesse). Seria a interferência uma indicação de que os elétrons realmente podem passar pelas duas fendas simultaneamente, podem estar em dois lugares ao mesmo tempo? Ou cada elétron passa necessariamente por uma das fendas? Transcorridos cem anos, ainda não há uma resposta consensual.

Felizmente, os resultados obtidos com a MQ não dependem de interpretações. A falta de um consenso sobre como interpretar os fenômenos microscópicos não impede que a MQ seja a teoria física mais bem-sucedida. Passou sem falhas em todos os testes ao longo dos últimos 100 anos, e está na base de quase todos os campos modernos da Física.

A MQ é um conjunto de postulados, conceitos, leis e equações que traduzem para a linguagem da matemática as regularidades e características observadas nos fenômenos que ocorrem no microcosmo. Pode-se olhar a MQ como uma poderosa caixa de ferramentas. Suas aplicações se estendem por inúmeras áreas: a MQ é usada rotineiramente na Física, na Química, na Engenharia e até na Biologia.

Durante algumas décadas, as discussões sobre como interpretar os conceitos da MQ foram consideradas de interesse puramente acadêmico. Se o sucesso da teoria era tão espetacular, por que se preocupar com questões mais próximas da Filosofia? Como veremos mais adiante, as discussões tidas a princípio como “filosóficas”,

estão na origem das moderníssimas e revolucionárias tecnologias quânticas.

Ondas e partículas são conceitos do nosso mundo cotidiano. Faltam palavras no nosso dicionário para descrever o microcosmo, e por isso tomamos emprestado os conceitos com que estamos habituados. Ondas se estendem pelo espaço, assim como a energia que elas transportam. Não têm uma localização específica. Cada elétron atinge o detector em um ponto bem determinado, o que significa que, pelo menos naquele instante, a sua massa e energia são concentradas. Mas antes de atingir o detector, os elétrons se propagam como ondas. Então, de que tipo de onda estamos falando quando analisamos o experimento da dupla fenda? O que a MQ tem a dizer sobre isso?

Na MQ, a propagação do elétron no espaço e no tempo é associada a uma onda. Sobre isso não há divergências. Mas muito se discutiu, e ainda se discute sobre a natureza dessa onda. Na interpretação em que me incluo, a onda associada ao elétron é diferente em um aspecto crucial: é uma onda que não transporta energia, transporta apenas *informação*. Trata-se de uma *onda de probabilidade*, que contém toda a informação disponível sobre o elétron (ou qualquer outro sistema microscópico). Não é uma entidade real, como uma onda eletromagnética, e sim de uma ferramenta matemática que nos permite calcular a probabilidade de cada possível caminho que um sistema quântico pode seguir, ou a probabilidade de cada um dos resultados possíveis de uma medição.

Pode ser um pouco frustrante saber que a MQ é “apenas” uma teoria probabilística. O determinismo da Física de Newton é substituído pela incerteza das probabilidades. Mas isso não é uma limitação da MQ, é como funciona o microcosmo. Podemos calcular exatamente a direção que uma bola de bilhar tomará após colidir com outra (um bom jogador de sinuca tem um domínio intuitivo das leis de Newton). Mas numa colisão entre dois elétrons, não é possível de antemão saber o destino de cada um. Só podemos calcular probabilidades de cada resultado possível. Para isso usamos a onda de probabilidade, também chamada de *função de onda*.

Schrödinger

Como ocorre com todas as outras ondas, as funções de onda são as soluções matemáticas de um tipo específico de equações, as equações de onda. A equação de Schrödinger, em homenagem ao seu criador, é a equação fundamental da MQ. A equação de Schrödinger é uma *equação diferencial*, ou seja, que trata da evolução de um sistema físico em etapas tão pequenas quanto queiramos. Mas não é o caso de entrarmos em detalhes matemáticos.

A função de onda é usada para calcular a probabilidade de o elétron tomar cada um dos caminhos possíveis no experimento da dupla fenda. De modo mais geral, permite calcular a probabilidade de cada futuro possível para um sistema físico microscópico, ou

seja, as formas como esse sistema pode evoluir com o tempo. É usada também para calcular a probabilidade de cada resultado possível de uma medição. Podemos resumir da seguinte forma:

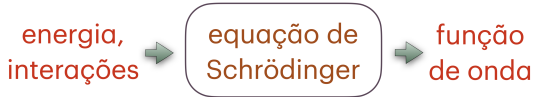


Figura 21: *A equação de Schrödinger determina como o estado de um sistema físico microscópico evolui no tempo.*

A Ciência trata do que pode ser observado, direta ou indiretamente. O método científico se baseia na observação metódica e detalhada dos fenômenos naturais; as teorias cumprem o papel de sistematizar as observações e dar um sentido geral a elas. Para que seja aceita como válida, uma teoria deve não só descrever os fenômenos conhecidos como também fazer previsões sobre outros fenômenos ou resultados de medições. É o teste a que todas as teorias devem se submeter. Na Física, regularidades observadas, tais como a conservação da energia ou a forma como um corpo exerce uma força sobre outro, podem ser traduzidas para a linguagem da Matemática como leis e princípios físicos.

Para fazer uma observação, é preciso provocar uma interação entre o sistema físico que se quer observar e o material de que é feito o detector. Na MQ, conhecemos o estado de um sistema quando fazemos alguma medição sobre ele, mas não sabemos o que ocorre entre

duas observações sucessivas. Pense em uma balada. A pista de dança é iluminada por luz estroboscópica, que acende e apaga, acende e apaga, acende e apaga... Vemos quem está dançando à nossa frente durante o tempo em que a luz está acesa, mas não vemos o seu movimento enquanto a luz está apagada. No mundo quântico acontece algo semelhante: só podemos definir o estado de uma partícula quando “a luz acende” e podemos “vê-la”, isto é, quando ela interage de alguma forma. É a única maneira de observar um objeto tão minúsculo.

Voltemos ao experimento da dupla fenda. Cada elétron tem apenas dois caminhos possíveis para alcançar o detector: passar através das fendas A ou B. Não há outra opção. O estado quântico de um elétron é bem definido em apenas dois momentos, quando ele sai do canhão de elétrons em direção ao anteparo e quando ele atinge o detector (Fig. 22). Não “vemos” os elétrons a não ser nesses dois momentos. Assim, a função de onda de cada elétron é a soma de duas componentes, uma que nos permite obter a *probabilidade do elétron passar pela fenda A* (ψ_A), e outra que nos dá a *probabilidade de o elétron passar pela fenda B* (ψ_B). Como não “vemos” o elétron entre o canhão e o detector, as duas possibilidades devem ser consideradas.

Entre o canhão e o detector, portanto, os elétrons se encontram em um *estado de superposição quântica*, ou seja que a descrição completa do seu movimento requer a soma das duas funções, $\psi = \psi_A + \psi_B$ (um pouquinho de matemática: se ψ_A e ψ_B são soluções da equação

de Schrödinger, a soma $\psi = \psi_A + \psi_B$ também é). A soma reflete a informação disponível sobre o elétron desde o canhão até o detector. Depois do anteparo, as duas ondas de probabilidade, ψ_A e ψ_B , se superpõem e interferem, exatamente como acontece com a luz (Figs. 11 e 12). Essa descrição retrata exatamente o que se observa nos experimentos reais.

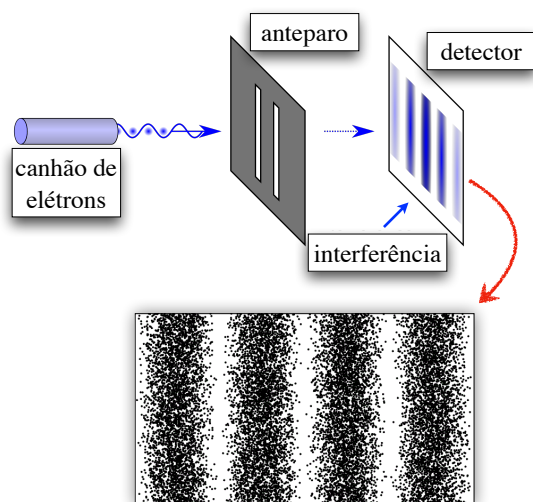


Figura 22: O princípio de superposição é um dos postulados básicos da MQ. Antes de ser observado, o estado de um sistema quântico é a soma de todos os estados possíveis. O ato da medida seleciona um desses estados.

Na versão alternativa do experimento, com o dispositivo que sinaliza a passagem de um elétron por uma das fendas, as ondas de probabilidade ψ_A e ψ_B não mais se superpõem. Agora conhecemos o caminho dos

elétrons, $\psi = \psi_A$ ou $\psi = \psi_B$, pois entre o canhão e o detector fazemos uma medição. A conclusão é que o estado quântico do elétron no percurso entre o canhão e o detector depende de ele estar sendo ou não observado! Há um vínculo indissociável entre o sistema em observação e o próprio observador (“observador” não é necessariamente um ser humano)! Esse fato pode parecer absurdo, mas é o que acontece, foi confirmado muitas vezes por diversos experimentos.

Segundo a MQ, a função de onda do elétron *antes* de passar pelo anteparo é $\psi = \psi_A + \psi_B$. Ao usar um dispositivo que acusa a passagem do elétron, fazemos uma medição com dois resultados possíveis: o elétron passou pela fenda A ou pela fenda B. A função de onda original “colapsa”, isto é, se reduz subitamente a um dos dois estados possíveis, ψ_A ou ψ_B . A medição, portanto, destrói a superposição, e a função de onda ψ , se reduz a apenas uma das suas componentes. Antes de medir qualquer propriedade de um sistema microscópico, não temos como saber qual será o resultado, seu estado quântico é indefinido. Temos que nos contentar com o fato de poder apenas calcular probabilidades, nesse caso, 50% para cada resultado possível, $\psi \rightarrow \psi_A$ ou $\psi \rightarrow \psi_B$. A ideia de “colapso da função de onda” é, no entanto, uma das mais polêmicas da MQ.

Heisenberg

Uma das suas pedras fundamentais da MQ é o *Princípio de Incerteza*, descoberto por Werner Hei-

senberg. Na verdade, o princípio se aplica a todos os tipos de onda, incluindo as “ondas de matéria”. Para entendê-la, vamos falar mais sobre o tipo mais simples de ondas, as *ondas planas*. Pense nos gráficos das funções seno(x) e cosseno(x): são ondas planas que se estendem ao longo do eixo x .

Na Fig. 12, vemos a superposição de duas ondas planas. O resultado, uma terceira onda, depende de três fatores: a amplitude, os comprimentos de onda de cada uma e a fase relativa entre elas. Dependendo da combinação desses três fatores, amplitudes podem se somar ou se subtrair. Existe um importante teorema matemático, o teorema de Fourier: qualquer função contínua e periódica, ou seja a que tenha um padrão que se repete a cada intervalo Δx , incluindo as funções de onda, pode ser representada por uma soma de ondas planas que tenham frequências, amplitudes e fases diferentes.

Na Fig. 23 vemos um exemplo com apenas três ondas planas, mas, em geral, é necessário somar muitas ondas planas diferentes para representar funções de onda. Pois bem, a função de onda de uma partícula livre, ou seja, uma partícula isolada, que não sofre a ação de nenhuma força, com momento linear p ($p = mv$) bem definido, é uma onda plana com comprimento de onda λ bem definido. Lembre que nas “ondas de matéria” de de Broglie, o momento linear da partícula livre está associado ao comprimento de onda pela relação de $p = \lambda/h$.

Ondas não têm *localização*, ou seja, se estendem

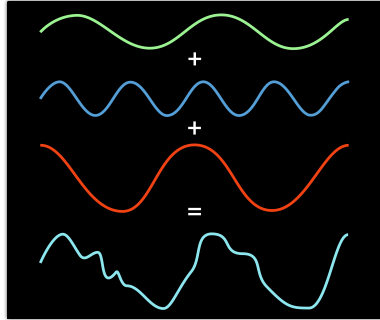
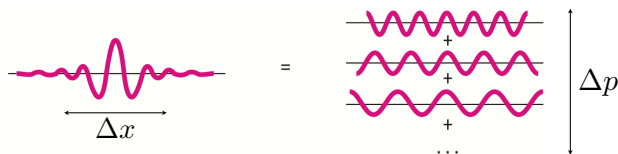


Figura 23: A superposição ou soma de ondas planas pode representar qualquer função contínua e periódica.

indefinidamente pelo espaço. Mas quando somamos muitas ondas planas diferentes, formamos um *pacote de ondas*, como na Fig. 24, com uma extensão Δx . Como a cada onda plana corresponde um valor de p ($p = h/\lambda$), podemos dizer que o momento linear da partícula está em um intervalo Δp . Quanto mais ondas planas somarmos, mais compacto se torna o pacote de ondas, com um intervalo Δx cada vez menor mas, em contrapartida, com um intervalo Δp cada vez maior. No limite, se somássemos um número infinito de ondas, a função de onda resultante descreveria de uma partícula com posição bem definida ($\Delta x = 0$). Mas isso implicaria não termos nenhuma informação sobre momento linear da partícula, pois a cada onda plana corresponde um valor de p ($\Delta p \rightarrow \infty$).

Em resumo, se quisermos saber a posição exata de uma partícula, precisaremos somar infinitas ondas



Um “pacote de onda” é o resultado da superposição de muitas ondas planas. Quanto mais ondas forem somadas, mais estreito fica o pacote.

Qualquer função contínua e periódica pode ser representada pela soma de ondas planas com fases, amplitudes e comprimentos de onda diferentes.

Figura 24: A superposição de ondas planas reduz a incerteza na posição, Δx e ao mesmo tempo aumenta a incerteza no momento linear, Δp .

planas, mas assim não saberemos nada sobre o seu momento linear, que pode ter qualquer valor. Se quisermos saber o momento linear exato da partícula, não saberemos nada sobre sua localização, que pode estar em qualquer lugar do Universo. Não é possível, portanto, determinar com precisão absoluta e simultaneamente a posição e o momento linear de uma partícula. A incerteza é inevitável.

O Princípio de Incerteza de Heisenberg estabelece a impossibilidade de determinar simultaneamente e com precisão absoluta alguns pares de propriedades de uma partícula. Na forma mais conhecida, discutida acima, o produto das incertezas na posição e no momento linear não pode ser menor que uma certa quantidade: $\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$ (novamente, a constante de Planck).

Essa é uma limitação física, insuperável, não importa o quão sofisticada seja a tecnologia. Heisenberg usou um “experimento mental” com radares para mostrar que é impossível preparar um sistema quântico que tenha, ao mesmo tempo, posição e velocidade definidas com precisão absoluta.

Os radares monitoram continuamente os aviões de carreira. Um radar emite sinais de radiofrequência (ondas eletromagnéticas com frequência menor que a da luz visível). Os sinais são refletidos pelos aviões e retornam ao radar. Medindo o tempo entre a emissão do sinal e seu retorno, e conhecendo a direção em que cada sinal foi emitido, determina-se a posição de cada avião. Naturalmente, o impacto do sinal do radar ao colidir com o avião é totalmente desprezível, produz um efeito imperceptível sobre a trajetória do avião, que segue viagem, inabalado.

Agora imagine um radar em miniatura, capaz de emitir um único fóton de cada vez, usado para determinar a posição de um elétron. Assim como acontece com o avião, o radar precisa “ver” o elétron para localizá-lo, ou seja precisa enviar um fóton para colidir com o elétron. Como o elétron tem dimensões inferiores a 10^{-18} m, o fóton deve ter muita energia (quanto maior a energia, maior é o poder de resolução).

Ao contrário do que acontece com os aviões, tanto o fóton como o elétron são lançados em direções imprevisíveis após a colisão, pois o elétron é extremamente leve. Para determinar a velocidade de um objeto, é necessário medir sua posição em pelo menos dois instan-

tes consecutivos ($v = \Delta x / \Delta t$), e para conhecer a sua trajetória, é preciso medir a sua posição várias vezes seguidas. Mas sem saber a direção que o elétron toma após a colisão com o fóton, não há como enviar outros fótons para medir suas novas posições. Assim, a conclusão inevitável é que é impossível seguir a trajetória do elétron.

Na escala atômica só podemos determinar o estado de um sistema físico qualquer se realizarmos algum tipo de medição sobre ele. Medir implica alguma forma de interação que inevitavelmente afeta o sistema que é medido. Com seu experimento mental, Heisenberg quis demonstrar porque não podemos seguir os elétrons dentro de um átomo, pois não há como determinar suas posições sucessivas. No mundo quântico, a ideia de trajetória não faz sentido. Nos átomos, por exemplo, podemos apenas delimitar as regiões em que os elétrons podem ser encontrados. Essas regiões são os *orbitais atômicos*, as regiões do espaço onde a função de onda do elétron não é nula.

Spin

O aspecto do mundo muda radicalmente à medida que observamos a Natureza em escalas cada vez menores. Novas propriedades e fenômenos aparecem. Não há, no entanto, um limite claro, bem definido entre o mundo macroscópico e o microscópico, quando a Mecânica de Newton deve ser substituída pela MQ. Observam-se comportamentos típicos do regime quântico em siste-

mas cada vez maiores. Essa é uma área de pesquisas muito ativa atualmente.

Mas voltemos ao mundo do que é muito, muito pequeno. Cada partícula elementar possui um conjunto de propriedades, ou características que a distingue das demais. Os prótons, por exemplo, são cerca de 2000 vezes mais pesados que o elétron e possuem carga positiva. Massa e carga elétrica são propriedades com que estamos habituados. Mas há outras propriedades que só existem no mundo quântico. Uma dessas propriedades, que todas as partículas elementares possuem, é o *spin*. O termo *spin* (giro, na língua inglesa) sugere que essa propriedade esteja relacionada de alguma forma a movimentos de rotação. Como não há nada parecido no nosso mundo macroscópico, só nos resta fazer analogias e usar imagens que, infelizmente, não são muito realistas, mas ajudam a “educar” nossa intuição.

Todas as partículas elementares têm a propriedade do *spin*, o que implica todas terem um *momento angular intrínseco*. No caso das partículas eletricamente carregadas, o *spin* faz com que se comportem como um minúsculo ímã, faz com que as partículas tenham um *momento magnético*. O *spin* é uma propriedade *quantizada*, ou seja, as grandezas momento angular e magnético só podem ter um conjunto finito de valores. Vamos ver em detalhes o que tudo isso significa.

Imagine um automóvel parado em um sinal. Na mesma rua e faixa, um segundo motorista, dirigindo um automóvel semelhante, se distrai olhando o celular e bate na traseira do primeiro. O motorista distraído

causaria danos muito mais significativos ao primeiro automóvel se estivesse em alta velocidade. Se o motorista distraído, em vez de um automóvel comum, estivesse dirigindo, um caminhão carregado de areia, com a mesma velocidade, causaria um dano ainda maior ao automóvel parado no sinal. A combinação de velocidade e massa forma a grandeza física *momento linear*, que está associada à força necessária para parar um corpo de massa m que se desloca com velocidade v . Quanto maior a massa e/ou a velocidade, maior será o momento linear de um objeto.

O momento angular é uma grandeza física análoga ao momento linear. Como o nome sugere, o momento angular está associado a movimentos de rotação. O momento angular de um objeto depende não só da massa e da velocidade de rotação, depende também da sua extensão espacial. Nas Olimpíadas de Inverno, no Hemisfério Norte, há competições de patinação artística sobre o gelo, onde o atrito é muito pequeno. Nessas apresentações, é comum vermos patinadoras e patinadores girando sobre si mesmos. Quando abrem os braços, giram mais devagar, e quando os encolhem, giram mais rápido. Isso acontece porque o momento angular permanece constante durante o giro, pois o atrito com o gelo é muito pequeno. Quando uma patinadora encolhe os braços, a extensão do seu corpo diminui. A velocidade de rotação deve aumentar para compensar a menor extensão do corpo da patinadora, mantendo o valor do seu momento angular sempre igual. O oposto acontece quando ela abre os braços.

Outro exemplo: amarre uma pedrinha em um barbante e gire-a sobre sua cabeça. O momento angular da pedrinha pode variar em três circunstâncias: se substituirmos a pedrinha por uma mais pesada; se o barbante mais for longo; se a pedrinha girar mais rápido. Assim como o momento linear de um objeto, o momento angular da pedrinha está ligado ao esforço necessário para pará-la.

Vamos agora ao Sistema Solar. Como quase todos sabemos, a Terra é redonda, orbita em torno do Sol ao mesmo tempo que gira em torno de si mesma. A Terra, portanto, tem um *momento angular orbital* devido à rotação em torno do Sol, e um *momento angular intrínseco* devido à rotação em torno do seu próprio eixo. O planeta Júpiter tem uma massa muito maior do que a da Terra, gira muito mais rapidamente e está muito mais longe do Sol. A combinação desses fatores fazem com que Júpiter tenha tanto o momento angular orbital como o intrínseco muito maiores que os da Terra. Já o planeta Vênus, com massa menor e mais perto do Sol, tem um momento angular orbital menor.

Elétrons são partículas elementares, e por isso possuem a propriedade do *spin*. Isso significa que elétrons têm um momento angular intrínseco. Dentro de um átomo, um elétron possui também um momento angular orbital, embora os átomos não sejam miniaturas do Sistema Solar. A imagem que mais se aproximaria do *spin* do elétron seria a de uma minúscula esfera carregada girando em torno de si mesma. Poderíamos pensar em uma esfera cujo diâmetro fosse diminuindo,

diminuindo, até se tornar um ponto. Mas o problema dessa imagem é que essa esfera fictícia teria que girar mais rápido do que a luz para produzir os mesmos efeitos do *spin* de um elétron real. A melhor analogia está longe da realidade, o *spin* é uma propriedade puramente quântica.

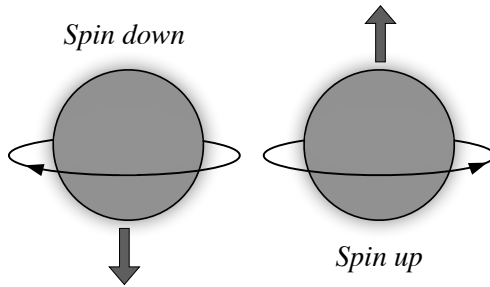


Figura 25: *No mundo macroscópico, só observamos o efeito coletivo dos spins dos elétrons. Todas as analogias para ilustrar o conceito de spin de uma partícula têm falhas.*

Os elétrons também têm um momento magnético. Aqui a melhor analogia é um anel metálico. Se uma corrente elétrica percorre o anel metálico, surge um campo magnético. O anel se comporta como um ímã. O momento magnético é uma medida da intensidade do campo magnético gerado pela passagem da corrente no anel. É um grandeza vetorial: sua direção é perpendicular ao plano do anel, e seu módulo é o produto da área do anel pela a corrente que passa por ele. Se o diâmetro do anel diminui, a corrente elétrica deve aumentar para que o momento magnético se mantenha constante. Se esse anel metálico for colocado em uma região onde

há um campo magnético, o seu momento magnético se alinhará com a direção desse campo externo, como uma bússola (Fig. 26). Imagine que o diâmetro do anel diminua continuamente, até virar um ponto. Há um problema com essa analogia: quando a área do anel tende a zero, a corrente que passa por ele tende a um valor infinito. Em um campo magnético externo, elétrons se comportam como se fossem minúsculas bússolas: o momento magnético se alinha a com a direção do campo externo.

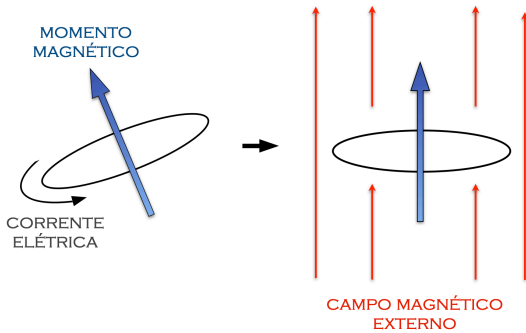


Figura 26: O momento magnético é uma grandeza que está associada ao campo magnético gerado por uma corrente em um anel metálico. No caso de elétrons, o momento magnético é uma medida do campo magnético que essas partículas geram.

O *spin* de uma partícula é uma propriedade *quantizada*. Para entender o que isso significa, imagine o *spin* como um vetor, como na Fig. 27. O vetor em vermelho só pode ter duas inclinações, uma positiva e outra negativa. O comprimento do vetor e a projeção no eixo

vertical especificam os dois *estados quânticos* possíveis. Quando o elétron participa de alguma interação com um fóton ou com outro elétron, ele pode passar do estado *spin up* para o estado *spin down* e vice-versa. É uma transição abrupta, sem estados intermediários.

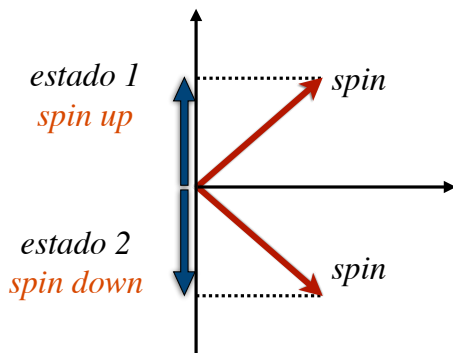


Figura 27: O *spin* do elétron pode estar em apenas dois estados. Fazendo uma analogia com um vetor, o estado de *spin* de uma partícula é definido por duas quantidades, o módulo do vetor e a sua projeção em um eixo qualquer.

3 - Átomos

“Se um cataclismo destruísse todo o conhecimento científico, e se tivéssemos apenas uma frase para deixar como legado às futuras gerações, ela seria 'tudo é feito de átomos'.”

Richard Feynman

Desde o início do século passado, sabia-se que os átomos não são meras bolinhas de matéria compactas e indivisíveis, pequenas demais para serem observadas. A descoberta da radioatividade foi um indício forte de que havia alguma estrutura dentro deles. Um passo gigantesco foi dado em 1911, quando Ernest Rutherford, Hans Geiger (o inventor do contador Geiger) e Ernst Marsden, em um experimento que entrou para a história, observaram o interior dos átomos pela primeira vez. Eles descobriram que dentro dos átomos há um núcleo, com carga positiva, cercado por uma nuvem de elétrons. Os núcleos são minúsculos, 10.000 vezes menores que os átomos, e neles praticamente toda a massa está concentrada.

A descoberta da estrutura atômica abriu o caminho para a criação da MQ. Não se sabia como essa estrutura funciona, o que mantém a estabilidade dos átomos. Para os físicos da época, esse era o grande problema a ser resolvido. A Física Atômica tornou-se a fronteira do conhecimento. Do esforço intelectual coletivo para desvendar esse enigma surgiu a MQ.

Nos anos que se seguiram à descoberta do núcleo atômico, entender o que se passa dentro dos átomos ocupou muitas das mentes mais brilhantes da Física. O enigma foi resolvido, em parte, com o nascimento da MQ (1925-26). Mas apenas em 1932, quando meu pai tinha um ano de idade, o átomo moderno tomou sua forma final. Naquele ano, ficamos sabendo o que há dentro dos núcleos atômicos: eles contêm prótons e nêutrons. A fronteira do conhecimento deslocou-se da Física Atômica para a Física Nuclear, uma camada mais profunda da estrutura da matéria.

Quase quatro décadas se passaram até descobrirmos, em 1968, que prótons e nêutrons não são partículas elementares, como até então se pensava. São feitos de partículas ainda menores: os *quarks*². Assim como o elétron, os quarks também são partículas elementares, pontinhos de matéria. Seu tamanho inferior a 10^{-18} m. É nessa camada em que estamos desde então. A fronteira atual é a Física de Partículas, sobre a qual falarei mais adiante.

Os átomos são eletricamente neutros. Possuem o mesmo número de elétrons e prótons. Nos elementos químicos encontrados na Natureza, a nuvem de elétrons é dividida em até sete camadas ou níveis de energia. Todos elétrons que se encontram em uma mesma camada têm aproximadamente a mesma energia. Os níveis de energia se dividem em subníveis, com valores de energia

²mais sobre os quarks em *Partículas para Todos*,
www.gov.br/cbpf/pt-br/divulgacao-cientifica/livros/particulas-para-todos

muito próximos que dependem do estado de *spin* dos elétrons. As propriedades químicas dos elementos são determinadas pelos elétrons da camada mais externa, a camada de valência. Existem 90 tipos diferentes de átomos encontrados na Natureza, e mais 28 que podem produzidos em laboratórios.

Rutherford imaginava o átomo como uma miniatura do Sistema Solar, em que o núcleo atômico fazia o papel do Sol e os elétrons, o dos planetas. É uma imagem bastante poderosa, tanto que persiste até hoje. Essa imagem está até no logo do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, onde eu trabalho. Ela remete a algo que conhecemos bem e podemos visualizar. Mas essa imagem está muito longe de ser verdadeira.

Os planetas orbitam o Sol devido à ação da gravidade. Os elétrons, por sua vez, estão confinados no interior dos átomos graças à atração elétrica exercida pelos núcleos atômicos. Mas a analogia acaba aqui. Se os elétrons seguissem órbitas bem definidas, como os planetas, os átomos simplesmente não poderiam existir!

A força elétrica exercida pelos núcleos faria com que os elétrons sofressem uma aceleração centrípeta. Desde o século XIX sabe-se que partículas carregadas em movimentos circulares (movimentos causados por forças centrípetas) perdem um pouco da sua energia a cada volta. Assim, a energia dos elétrons diminuiria continuamente, o que faria com que eles se aproximassem cada vez mais dos núcleos. O movimento em espiral terminaria com os elétrons sendo absorvidos pelos núcleos, como um satélite em órbita da Terra que aos poucos

vai perdendo altitude, até se desintegrar na atmosfera. Se os átomos fossem assim, nós não estaríamos aqui!

A MQ foi desenvolvida para desvendar o enigma da estrutura do átomo, explicar como elétrons e núcleos atômicos formam estruturas tão estáveis. Apesar de serem muito pequenos, os átomos são objetos extensos, ocupam um volume no espaço. Mas é sempre bom lembrar que eles não são bolinhas minúsculas, com uma superfície separando o interior do exterior. Mais se parecem com uma nuvem muito rala e difusa. Na verdade, os átomos são um imenso vazio: um minúsculo núcleo atômico cercado por distantes pontinhos de matéria, sem nada entre eles.

Os mais simples de todos, os átomos de hidrogênio, são formados por um único próton e um único elétron. Se um átomo de hidrogênio fosse do tamanho do Maracanã, o núcleo seria do tamanho de uma bolinha de ping-pong no centro do gramado. O resto seria espaço vazio. Em algum lugar nesse vazio está o elétron solitário. Mas não é possível encontrá-lo em qualquer lugar em torno do núcleo, só é possível achá-lo em determinadas regiões, os orbitais atômicos. Os átomos de hidrogênio, mesmo sendo os mais simples, são sistemas físicos bastante complexos.

Espectros

Joseph Fraunhofer foi um ótico alemão que viveu entre os séculos XVIII e XIX. Naquela época, já se sabia que a luz do Sol, ao passar por um prisma, se

decompõe nas diversas cores do arco-íris. Fraunhofer era um mestre na arte de manipular o vidro. Construiu instrumentos óticos da mais fina qualidade, e com eles estudou o espectro do Sol. Em 1815, Fraunhofer fez uma descoberta notável: o espectro da luz do Sol não é um contínuo de cores, que vai do vermelho ao violeta. Existe uma série de linhas escuras entremeando as regiões de cores contínuas, como ilustrado na Fig. 28. Fraunhofer não se satisfaz em analisar a luz do Sol: com seus instrumentos muito sensíveis, ele estudou a luz das estrelas mais brilhantes. Quando comparou o espectro da luz das estrelas com o do Sol, encontrou as mesmas linhas escuras!

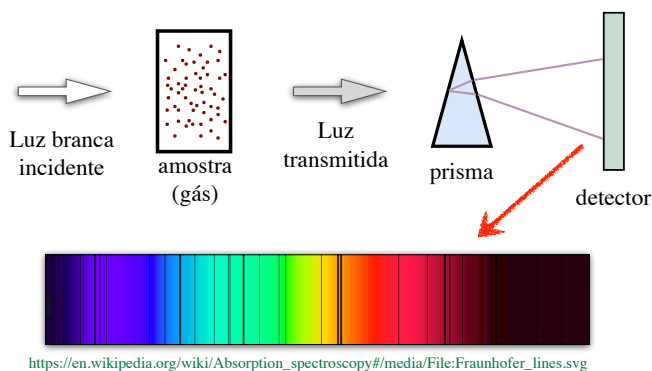


Figura 28: *O espectro de absorção. Algumas frequências da luz incidente são absorvidas pela amostra, deixando as linhas pretas no espectro.*

A radiação que o Sol emite é composta por um conjunto de ondas de frequências diferentes. A parte visível

do espectro solar consiste nas inúmeras frequências que formam o arco-íris. A luz do Sol é criada pelas reações termonucleares no centro da estrela. Para chegar até nós, luz tem que atravessar a atmosfera solar. Na travessia, alguns comprimentos de onda específicos são absorvidos pelos átomos das camadas mais exteriores do Sol. Assim, olhando o espectro solar bem de perto, veremos as linhas escuras descobertas por Fraunhofer, que correspondem às frequências da luz absorvida pela atmosfera solar. O fato notável é que as linhas estão na mesma posição do espectro de elementos químicos medidos nos laboratórios terrestres: sódio, magnésio, cálcio e ferro.

Os espectros são uma espécie de “impressão digital” dos elementos químicos. Cada elemento tem o seu, e ele é único. Os espectros dos elementos químicos são medidos com precisão nos laboratórios terrestres, e assim podemos compará-los com os espectros da luz das estrelas. Com instrumentos modernos, foi possível analisar o espectro de um grande número de estrelas muito distantes, determinando a sua composição química. Dessa forma, aprendemos que *tudo o que vemos no Universo é feito de átomos, os mesmos que temos aqui na Terra, que formam nosso corpo e todas as coisas*. Lamento desapontar os amantes de ficção científica, mas não há um “elemento desconhecido”, que alienígenas usariam para construir suas naves para nos visitar.

Há dois tipos de espectro. O primeiro tipo é o *espectro de absorção*, que está ilustrado na Fig. 28. As linhas pretas indicam as frequências que faltam ao espectro.

São as componentes da luz que foram absorvidas pelos átomos no caminho entre a fonte luminosa e o observador.

O segundo tipo é o espectro de emissão, que é radicalmente diferente do primeiro. Em vez de ser iluminada, uma amostra de um elemento químico é aquecida dentro de um tubo até emitir luz. Ao atravessar um prisma, a luz se decompõe. Nesse caso, o espectro contém algumas linhas coloridas sobre um fundo preto, distribuídas aparentemente ao acaso.



Figura 29: O espectro de emissão complementa o de absorção. Os átomos do gás absorvem energia, através de uma descarga elétrica, por exemplo, e emitem luz de determinadas frequências.

No começo do século XX, a origem dos espectros ainda era um mistério. Mas já se sabia de um fato intrigante: quando sobrepostos, os dois tipos de espectros se encaixam perfeitamente. As linhas que faltam ao espectro de absorção são exatamente as linhas coloridas do espectro de emissão. Isso vale para qualquer elemento químico. Sem dúvida, essa coincidência não era acidental, indicava uma pista valiosa sobre o que acontece dentro dos átomos.

Saltos quânticos

O enigma das linhas espectrais foi parcialmente resolvido em 1913 pelo grande físico dinamarquês Niels Bohr. Os átomos só conseguem absorver fótons se estes tiverem alguns valores de energia bem específicos. Quando isso acontece, os elétrons podem passar de uma camada à outra, de energia maior. Para os demais fótons, o átomo é transparente (se a energia do fóton for suficientemente alta, pode haver ionização do átomo).

Os elétrons atômicos podem estar em diferentes estados de energia, dependendo da camada em que estejam. Para um elétron passar de uma camada à outra, é necessário que receba o estímulo correto, que consiste na absorção de um fóton com energia igual à diferença de energia entre dois níveis. Quando um átomo absorve o fóton, um elétron “salta” de uma órbita à outra. Pense na luz piscante: luz acesa, vemos o elétron na camada A; luz apagada, não sabemos o que se passa com o elétron; luz acesa novamente, e vemos o elétron na camada B. Não se sabe como o elétron faz a transição entre as duas camadas. Não é possível acompanhar o salto, medir o quanto dura a transição de uma camada à outra, pois não há trajetórias no microcosmo. É simplesmente assim: o elétron desaparece na camada A, e aparece na camada B.

Einstein nunca aceitou os *saltos quânticos*, uma das razões que o fizeram considerar a MQ uma teoria incompleta. Mas os saltos realmente acontecem, são comprovados por inúmeros experimentos. Quase que

imediatamente, o elétron volta à sua camada original. Da mesma forma súbita, o elétron agora desaparece da camada B e aparece na camada A. O átomo, então, expele a energia que havia absorvido e volta ao seu estado de equilíbrio, ou seja, emite um fóton cuja energia é justamente a diferença entre as energias dos níveis A e B. Como o número máximo de camadas é sete, o número de transições (ou “saltos”) possíveis é limitado. A cada transição entre duas camadas corresponde um fóton com energia bem definida, $E_{\text{fóton}} = \text{energia da camada B} - \text{energia da camada A}$.

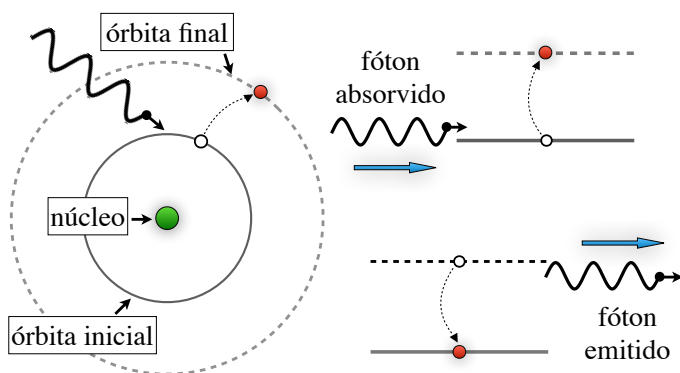


Figura 30: Os “saltos quânticos” deram origem a muita polêmica, opondo Einstein e Schrödinger a Heisenberg e Bohr. O fóton emitido pelo átomo tem a mesma frequência do que foi absorvido.

Assim surgem as linhas espectrais. Cada linha corresponde à luz com uma frequência bem definida que, por sua vez, corresponde a uma transição possível de

um elétron entre dois níveis de energia. A energia dos fótons é proporcional à frequência ($E = \lambda f$), logo, a posição das linhas espectrais indica a diferença de energia entre as camadas de cada elemento químico. Se os elétrons atômicos pudessem ter qualquer valor de energia, não haveria linhas, os espectros seriam sempre contínuos.

No espectro de absorção, os átomos do material iluminado absorvem fótons de determinadas frequências, deixando o restante passar. Os átomos funcionam como uma espécie de filtro: a absorção de luz de alguns comprimentos de onda específicos causa “buracos” no espectro. A luz que não é absorvida dá origem ao espectro do tipo arco-íris. A luz absorvida é emitida numa direção qualquer, e não chega ao detector. Essa é a origem das linhas pretas observadas no espectro de absorção (Fig. 28).

No espectro de emissão, os átomos são excitados por uma fonte de energia externa, e os elétrons “pulam” para órbitas mais altas. Ao se desexcitarem, os átomos emitem fótons com comprimentos de ondas correspondentes às diferenças entre dois níveis de energia. Essa é a única luz que é emitida, e é a origem das linhas coloridas no espectro de emissão. Em ambos os casos, emissão e absorção, a energia dos fótons absorvidos ou emitidos sempre correspondem à diferença de energia entre as camadas envolvidas nos saltos. Por isso as linhas dos espectros de emissão e absorção coincidem. Os dois espectros são complementares.

Na Fig. 31, os níveis de energia das órbitas possíveis

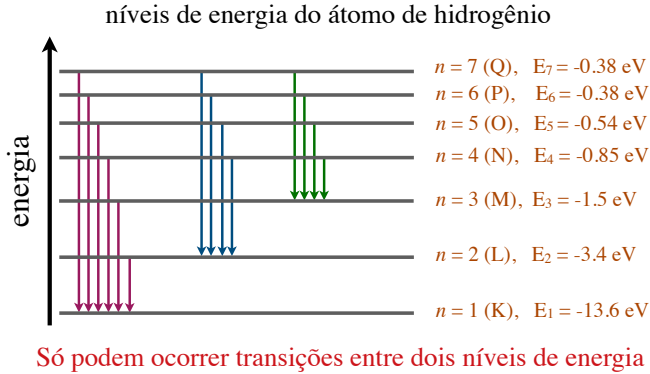


Figura 31: Esquema dos níveis de energia do átomo de hidrogênio. A cada “salto” corresponde um fóton com a energia indicada.

para o átomo de hidrogênio estão ilustradas. As transições dos elétrons entre as camadas implicam a emissão de fótons. Os valores da energia de cada camada variam de acordo com o tipo de elemento químico. Os valores da energia das camadas do hidrogênio não são os mesmos dos do oxigênio, que são diferentes dos do nitrogênio, alumínio, ferro e assim por diante. É como se isso fosse uma assinatura de cada elemento, e por isso podemos identificá-lo analisando a posição das linhas em seus espectros. Na figura, vemos o valor da energia de cada camada. Os fótons emitidos pelos átomos terão sempre uma energia dada por $E_{\text{foton}} = E_i - E_j$, onde i e j especificam o órbita de partida e a de chegada.

4 - Partículas entrelaçadas

A MQ, como vimos, introduziu um novo olhar sobre a Natureza, radicalmente diferente de tudo o que havia antes. A revolução científica do início do século passado deu origem à revolução tecnológica que afeta a vida de todos nós. As invenções do transistor e do laser, possíveis graças à MQ, formam a base do nosso mundo digital contemporâneo.

Passados 100 anos, o potencial inovador da MQ não está esgotado. Ao contrário, está em curso, nesse momento, uma segunda revolução tecnológica, baseada em um fenômeno que talvez seja o mais característico da MQ: o *emaranhamento ou entrelaçamento quântico*. Embora a possibilidade de sistemas emaranhados existirem tenha sido percebida por Einstein e Schrödinger, em 1935, sua importância ficou clara somente a partir da década de 1960.

Para começar, vamos falar sobre um conceito muito importante na Física, o conceito de *correlação* entre duas ou mais grandezas ou sistemas físicos. Quando o valor de uma grandeza a depende do valor de uma outra grandeza b , e vice-versa, dizemos que a e b são grandezas correlacionadas. Se, ao contrário, o valor de a independe do valor de b , e vice-versa, as duas são grandezas *não-correlacionadas*, como ilustrado na Fig. 32. Da mesma forma, se o estado quântico de uma partícula a está vinculado ao estado quântico da partícula b , dizemos que as duas partículas estão

correlacionadas.

O emaranhamento quântico é uma correlação muito forte entre duas ou mais partículas, que permanece até que uma medição seja feita sobre uma delas, *não importa o quão longe estejam uma da outra*. O estado emaranhado de duas partículas surge a partir de um vínculo que é criado no momento da produção do par. Esse vínculo, ou correlação, está sempre associado a alguma lei de conservação. Um exemplo é a desintegração de um núcleo atômico radioativo. Além no núcleo que resta, dois fótons são emitidos, e ambos obedecem às leis da conservação da energia, do momento linear e do momento angular. Se o núcleo atômico original está em repouso no laboratório, os fótons são emitidos em direções opostas.

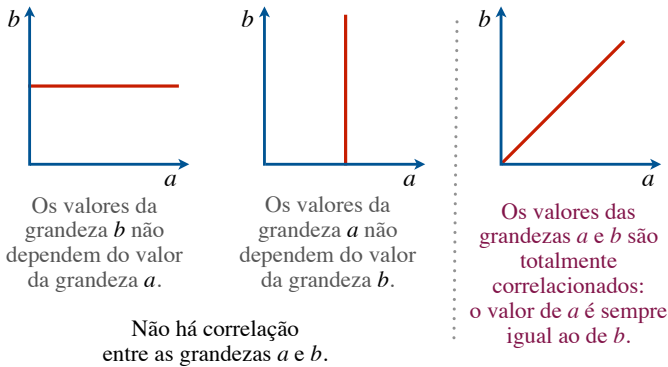


Figura 32: Correlação significa interdependência entre duas ou mais variáveis.

Em um par de partículas a e b emaranhadas, uma

medição feita para determinar o estado de *spin* da partícula *a*, por exemplo, determina *instantaneamente* estado de *spin* de *b*, mesmo que a partículas *a* esteja na Terra e *b* na galáxia de Andrômeda. Se fizermos uma medição do *spin* de *b*, usando um segundo detector, idêntico ao primeiro, um único resultado será possível. À primeira vista, pode parecer que o primeiro detector envia um sinal instantâneo ao segundo, comunicando o seu resultado. Mas veremos que esse não é o caso.

Einstein e Schrödinger, foram os primeiros a perceber que a existência de estados emaranhados é uma das consequências da MQ. E ao se darem conta disso, ambos ficaram muito perplexos. Em 1935, Einstein, Podolsky e Rosen publicaram um artigo histórico, que ficou conhecido como EPR (as iniciais dos autores), em que pretendiam mostrar que a MQ, apesar de todo o sucesso, ainda era uma teoria incompleta.

Eis a crítica de Einstein, ilustrada por mais um de seus experimentos mentais. Imagine um par de partículas idênticas e emaranhadas, *a* e *b*. As partículas são criadas, por exemplo, em uma colisão de duas partículas iniciais que desaparecem, e em seu lugar surgem *a* e *b*. Se o centro de massa da colisão está em repouso no referencial do laboratório, *a* e *b* se propagam em direções opostas até atingirem dois detectores muito afastados entre si, de forma que não haja comunicação possível entre eles. Se medirmos a posição da partícula *a*, a posição da partícula *b* fica instantaneamente determinada, sem precisar que fosse medida, pois o par é emaranhado. Segundo o Princípio de Incerteza de

Heisenberg, tendo medido a posição exata de a , nada saberíamos sobre o momento linear das duas partículas.

Se, em vez de medir a posição de a , escolhêssemos medir o seu momento linear, o momento da partícula b estaria instantaneamente determinado. Nesse caso, no entanto, não teríamos nenhuma informação sobre a posição das partículas. Sendo assim, o estado da partícula b dependeria do tipo de medição que escolhêssemos fazer sobre a partícula a . Ou seja, o detector da partícula b deveria receber um sinal instantâneo emitido pelo primeiro detector, comunicando o tipo de medida feita em a (nesse exemplo, posição e momento linear). Isso seria uma clara violação da Relatividade, que estabelece que nenhum sinal pode se propagar mais rápido que a luz.

É importante ressaltar que Einstein não tinha dúvidas de que a MQ, da qual foi um dos principais criadores, era uma teoria correta. Mas ele nunca aceitou a ideia de “saltos quânticos”, e com o exemplo dos estados emaranhados queria apenas mostrar que a MQ era uma teoria incompleta. Para ele, pares emaranhados seriam emitidos pelas fontes já com suas propriedades físicas bem definidas, como momento linear, momento angular ou *spin*. As propriedades, que estariam pré-definidas para cada partícula durante todo o tempo, seriam apenas desconhecidas (uma manifestação da nossa ignorância), e se revelariam no momento da medição. Segundo Einstein, uma medição feita sobre uma das partículas não poderia afetar qualquer medição feita sobre a outra. Portanto, faltava à MQ um mecanismo

que definisse as propriedades de cada partícula do par emaranhado já na sua formação. Essas propriedades seriam determinadas por *variáveis ocultas*, que seriam parte de uma teoria mais abrangente e que deveria complementar a MQ. Assim, o *determinismo* da Física Clássica estaria recuperado, e a *localidade* estaria preservada.

A crítica de Einstein evoca dois conceitos tão familiares que sequer pensamos sobre eles. Imagine dois gêmeos univitelinos, um morando no Brasil e outro na China. O irmão no Brasil faz um teste para saber seu tipo sanguíneo: AB+. Imediatamente o tipo sanguíneo do irmão na China fica determinado. É claro, essa característica genética estava definida desde o nascimento dos dois, e ela acompanha cada gêmeo ao longo da vida (o tipo sanguíneo de cada indivíduo não muda com o tempo). Este é o conceito de *realismo*. Cada gêmeo é um indivíduo independente. Outro exemplo é o jogo de dados. O resultado pode ser qualquer entre um e seis, mas os números já estavam marcados antes de o dado ser jogado.

Voltando aos gêmeos, se o da China faz algum outro tipo de exame, o resultado, obviamente, não sofre nenhuma interferência do tipo de exame feito pelo gêmeo no Brasil. Este é o conceito de *localidade*. Quando meço o tamanho do meu pé direito, meu pé esquerdo não encolhe ou estica. A medição do tamanho de um pé não interfere na do outro. A propriedade tamanho já existia, eu apenas não sabia o seu valor. Nosso cotidiano é regido pelo *realismo local*, algo que faz parte

da nossa intuição do mundo físico.

As ideias de Einstein influenciaram muitos físicos, que puseram a mão na massa na tentativa de criar uma versão alternativa da MQ que incluísse as variáveis ocultas. Bohr se opôs frontalmente a essa ideia, e teve com Einstein uma longa e histórica discussão. Mas a MQ funciona perfeitamente bem. Para a maioria dos físicos, muito pragmáticos, essas discussões eram consideradas acadêmicas, filosóficas, sem quaisquer consequências práticas.

Trinta anos se passaram até que o físico irlandês John Bell encontrou uma forma de testar experimentalmente a hipótese de Einstein. Em um artigo histórico, que abriu as portas para a segunda revolução quântica, Bell mostrou que se a hipótese de Einstein estivesse correta, uma combinação de correlações entre as partículas emaranhadas não poderia exceder um certo valor. As correlações previstas pela MQ poderiam, portanto, ser numericamente confrontadas com as previstas pelas teorias com variáveis ocultas. Uma questão filosófica poderia ser resolvida com experimentos! Mas foram necessários mais 20 anos até que houvesse a tecnologia necessária para esse experimento.

O primeiro teste foi feito em 1982, pelo físico francês Alain Aspect, que viria a receber o Prêmio Nobel pelo seu trabalho. O experimento de Aspect, no entanto, tinha algumas limitações técnicas, pois os detectores disponíveis naquele tempo eram pouco eficientes. A tecnologia se desenvolveu rapidamente e, nas décadas seguintes, vários outros experimentos semelhantes con-

firmaram o resultado obtido por Aspect: Einstein estava errado! Os experimentos são bastante complexos, mas podemos resumir a ideia básica. Para isso, voltemos à Fig. 9.

Nas ondas eletromagnéticas, os campos elétrico e magnético vibram em planos perpendiculares entre si e à direção de propagação da onda. Na Fig. 9, a onda EM se propaga ao longo do eixo z e o campo elétrico vibra ao longo do eixo y , mas nada impede que ele oscile ao longo de qualquer direção no plano $x - y$. A direção em que o campo elétrico oscila determina a *polarização da luz*. A luz do Sol não é polarizada, ou seja, é uma mistura de ondas EM cujos campos elétricos vibram em muitas direções diferentes, como na Fig. 33. Em geral, um polarizador é um filtro que seleciona ondas cujo campo elétrico vibra em uma única direção θ , a direção do seu eixo. Há um tipo especial de polarizador, no entanto, que permite tanto a passagem das ondas alinhadas aos seus eixos como as alinhadas perpendicularmente a ele.

É bom lembrar que uma onda EM é o efeito coletivo de um número astronômico de fótons, os *quanta* de luz. Mas os fótons não oscilam para cima e para baixo, como o campo elétrico, se propagam sempre em linha reta. Fótons são partículas com a propriedade do *spin* e, assim como os elétrons, se comportam como minúsculos ímãs. Então, quando falamos da polarização de um fóton estamos nos referindo à direção espacial do seu *spin* (a orientação do mini-ímã). A polarização de um feixe luminoso é um efeito macroscópico que apenas

reflete o estado de polarização dos fótons, um efeito microscópico.

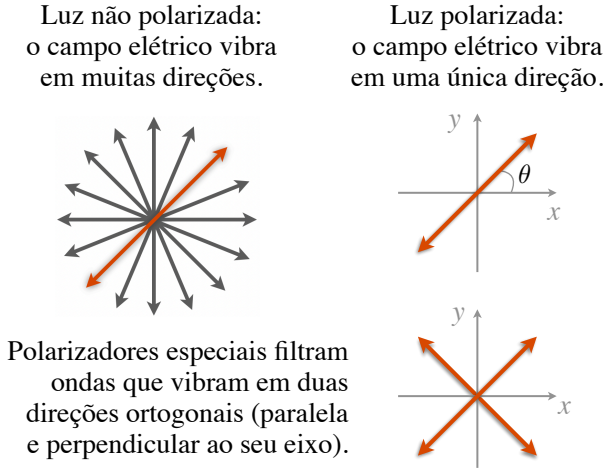


Figura 33: Os filtros polarizadores são dispositivos que permitem a passagem, de ondas que vibram em uma determinada direção, o eixo do polarizador. Polarizadores especiais permitem a passagem de luz polarizada em duas direções ortogonais, uma paralela e a outra perpendicular ao eixo do polarizador. No desenho acima, a luz se propaga em uma direção perpendicular ao plano da tela.

Muitos experimentos diferentes foram montados para testar as correlações entre partículas emaranhadas. O objetivo principal era comparar os resultados experimentais com as previsões da MQ e de teorias com variáveis ocultas. Apesar de os experimentos serem os mais variados, quase todos seguem a ideia representada na Fig. 34. Nesse exemplo, uma fonte radioativa emite dois fótons emaranhados que se propagam em direções

opostas, ao longo do eixo z .

Existem dois estados possíveis para a polarização dos fótons, que podem ser representados por vetores perpendiculares entre si. Para um fóton que se desloque ao longo do eixo z , o vetor polarização pode ter uma direção qualquer no plano $x - y$. Em um par emaranhado, a polarização *é sempre a mesma para os dois fótons* (dois vetores paralelos).

Na Fig. 34, dois polarizadores idênticos, A e B, estão suficientemente afastados um do outro para que não haja comunicação possível entre eles. Além disso, A e B são dispositivos independentes: a orientação do polarizador B não é afetada pela orientação de A. Os polarizadores permitem a passagem tanto de fótons com polarização paralela ao seu eixo como os de polarização perpendicular a ele, nos dois casos com 100% de probabilidade. No caso mais geral, a polarização do fóton não coincide com a direção dos eixos dos polarizadores. Mesmo assim, os fótons ainda podem passar pelo polarizador, mas com uma probabilidade menor, que depende do ângulo entre a polarização do fóton e o eixo do polarizador.

Os fótons que passam pelos polarizadores são coletados por detectores idênticos e independentes a e b . Cada detector pode emitir dois sinais: $+1$, se o fóton é detectado com polarização alinhada ao eixo do polarizador, e -1 quando os fótons têm polarização perpendicular. Se, por exemplo, tanto a polarização dos fótons como os eixos de ambos os polarizadores estiverem alinhados em uma mesma direção, os resultados dos

detectores a e b serão necessariamente iguais, $a = +1$ e $b = +1$. Se a direção dos polarizadores é mantida, mas os fótons agora têm polarização perpendicular aos seus eixos, os resultados dos dois detectores novamente coincidem, $a = -1$ e $b = -1$. Nessas circunstâncias, as correlações são máximas e nenhum outro resultado é possível. Mas se a direção do polarizador A pode variar livremente e de forma independente do polarizador B, é possível que os detectores a e b tenham resultados diferentes. Temos, portanto, quatro combinações de resultados (a, b) : $(+1, +1)$, $(-1, -1)$, $(+1, -1)$ e $(-1, +1)$, como ilustrado na Fig. 35.

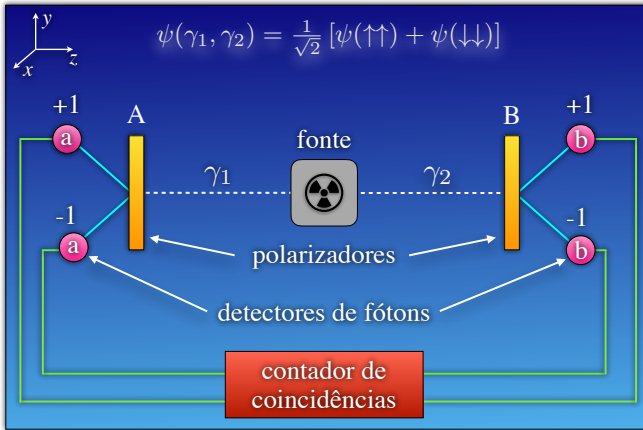
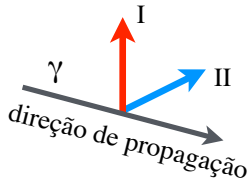


Figura 34: Esquema simplificado de um experimento para testar as correlações de pares de partículas emaranhadas. Os fótons emaranhados γ_1 e γ_2 têm sempre a mesma polarização. O contador de coincidências registra os sinais dos detectores a e b para cada par de fótons, quando ambos são detectados.



A polarização é um vetor perpendicular à direção de propagação do fóton (γ). Dois estados de polarização são possíveis, I e II, representados por vetores perpendiculares entre si.

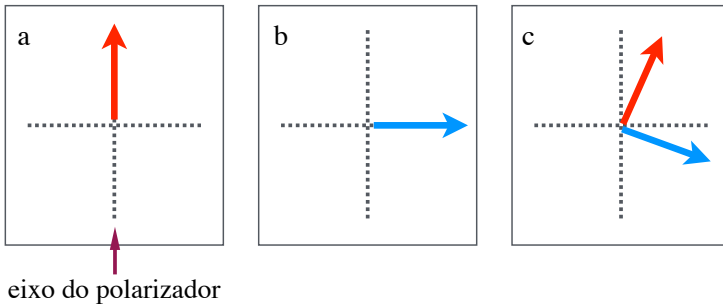


Figura 35: Os polarizadores especiais também permitem a passagem de fótons com polarização perpendicular ao eixo. Na figura a, o fóton tem 100% de probabilidade de atravessar o polarizador, pois polarização do fóton coincide com a direção do eixo. Os detectores após os polarizadores retornam o sinal +1. O mesmo acontece na figura b, só que agora os detectores retornam sinal -1. Em geral, a polarização e o eixo do polarizador têm orientações diferentes (c). Nesse caso, o fóton ainda pode atravessar o polarizador, mas com menor probabilidade. Como a orientação dos polarizadores é aleatória, os detectores podem produzir os sinais (+1,-1) ou (-1,+1).

Os experimentos consistem em registrar um número muito grande de pares fótons oriundos da fonte radioativa. Em cada par emaranhado, como vimos, os dois fótons sempre têm a mesma polarização. A polarização, entanto, é aleatória, pode ter qualquer direção no plano $x - y$, e cada par têm uma polarização diferente da

do anterior. A orientação de cada polarizador também é aleatória e muda continuamente. Para cada par de fótons emitido pela fonte, a direção de cada polarizador é definida durante o tempo de voo dos fótons.

Trilhões de pares de fótons são analisados, e o número de contagens de cada uma das quatro combinações possíveis é computado. As quatro contagens são combinadas em uma única variável, cujo valor não poderia exceder um limite, caso a teoria com variáveis ocultas estivesse certa e a MQ estivesse errada.

Os resultados dos diversos tipos de experimentos não deixam dúvidas: a previsão da MQ é uma teoria completa, não há variáveis ocultas! Em um par emaranhado, a informação não está contida em cada partícula, e sim no conjunto. Antes de fazer uma medição, o estado de polarização dos fótons é *indeterminado*. Sabemos apenas que deve ser o mesmo para os dois fótons de cada par. Mas a indeterminação não se deve à nossa ignorância. *A propriedade polarização só passa a existir após a medição ser feita em uma das partículas!*

A função de onda do par representa *os dois fótons*, $\psi(\gamma_1, \gamma_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} [\psi(\uparrow\uparrow) + \psi(\downarrow\downarrow)]$. As setas ilustram os dois estados possíveis de polarização de cada fóton, como mostrado na Fig. 35. Como são partículas emaranhadas, os dois fótons têm sempre a mesma polarização ($\gamma_1 = \uparrow, \gamma_2 = \uparrow$ ou $\gamma_1 = \downarrow, \gamma_2 = \downarrow$).

Imediatamente após uma medição ser feita em um dos fótons, a superposição dos dois estados de polarização possíveis desaparece. A função de onda do

par se torna $\psi(\gamma_1, \gamma_2) = \psi(\uparrow\uparrow)$, ou $\psi(\gamma_1, \gamma_2) = \psi(\downarrow\downarrow)$, mas nunca $\psi(\gamma_1, \gamma_2) = \psi(\uparrow\downarrow)$ ou $\psi(\gamma_1, \gamma_2) = \psi(\downarrow\uparrow)$. A função de onda do par, $\psi(\gamma_1, \gamma_2)$, não pode ser escrita como o produto $\psi(\gamma_1) \times \psi(\gamma_2)$. Partículas emaranhadas não podem ser tratadas separadamente, a informação só existe se analisarmos o par como em um único sistema quântico, compartilhando uma única função de onda. É como se o conteúdo de livro só fosse acessível apenas se pudéssemos ler todas as páginas ao mesmo tempo. Se olhássemos cada página separadamente, veríamos apenas um borrão. A informação está contida no todo e os componentes não podem ser tratados individualmente.

Os experimentos mostraram que o emaranhamento quântico é um fenômeno *não-local*. No mundo quântico, o princípio da localidade não se aplica em todas as circunstâncias. Nos sistemas emaranhados, a informação não está localizada, se estende pelo todo. Um par de partículas emaranhadas funciona como um corpo rígido. O emaranhamento é um fenômeno fantástico, que abre as portas para a nova revolução tecnológica que está em andamento – computação quântica, criptografia, teleportação, entre outras. Mas, infelizmente, o emaranhamento não pode ser usado para comunicações instantâneas, como nos filmes de ficção científica. Não existe transmissão instantânea de informação.

5 - Quarks & léptons

Talvez você já tenha visto uma matrioska. São bonecas de madeira típicas da Rússia, muito bonitinhas, usadas como decoração. Ao abrirmos uma matrioska, encontramos uma outra boneca, com a mesma forma mas com tamanho menor. Quando abrimos a segunda boneca, surge uma outra igual, mas ainda menor, que contém outra... Uma matrioska contém várias bonecas no seu interior, uma sucessão de camadas.



Figura 36: *As matrioskas são bonecas russas tradicionais. Dentro de cada uma há sempre outra menor.*

As matrioskas representam bem a evolução do nosso conhecimento sobre a estrutura da matéria. Dentro dos átomos, descobrimos o núcleo atômico; dentro destes, encontramos prótons e nêutrons; prótons e nêutrons são partículas compostas, dentro deles existem os *quarks*. É nesse ponto em que nos encontramos no presente. Não

conhecemos nenhuma estrutura menor que os quarks. Mas não há razão para supor que tenhamos chegado ao fim, que não exista outra “bonequinha” dentro dos quarks. Não temos ainda a tecnologia para “abrir” os quarks e ver se há alguma coisa dentro deles.

Não sabemos, portanto, se os quarks têm um “tamanho” (lembre-se de que no mundo quântico, tamanho não é uma propriedade bem definida). Se os quarks tiverem um tamanho, este seria menor que 0,000.000.000.000.000.001 m. Para todos os fins práticos, os quarks e os elétrons são *partículas elementares*, ou seja, não ocupam um volume no espaço, não possuem um conteúdo, são literalmente pontinhos de matéria.

As partículas elementares são, portanto, os menores constituintes da matéria que conhecemos. *Tudo* o que é visível no Universo é feito a partir dessas unidades fundamentais. Existem 12 partículas elementares, divididas em duas classes, ou famílias: os quarks e os léptons. Cada classe tem seis membros. Em ordem crescente de massa, os seis quarks são o *up* (*u*), *down* (*d*), *strange* (*s*), *charm* (*c*), *beauty* (*b*) e *top* (*t*). Os quarks *up* e *down* são muito mais leves que os demais. São também os únicos estáveis. Eles são as partículas que formam os prótons e nêutrons. Os prótons são uma combinação de dois quarks *u* e um quark *d*, enquanto os nêutrons contêm dois quarks *d* e um quark *u*. Todos os demais quarks se desintegram muito rapidamente e de forma espontânea. Eles são produzidos em colisões violentas entre partículas (entre dois prótons, por exemplo), que

ocorrem nos aceleradores de partículas ou quando raios cósmicos (partículas ultraenergéticas vindas do espaço que bombardeiam a Terra continuamente) penetram na atmosfera e colidem com as moléculas de ar.

Quando se desintegram, os quarks mais pesados desaparecem, mas a energia sempre se conserva. Em seus lugares, surgem quarks mais leves e outras partículas de menor massa. A soma das energias dos produtos de uma desintegração é sempre igual à energia da partícula inicial. O quark t , o mais pesado de todos, se desintegra espontaneamente formando um quark b , que por sua vez, decai (sinônimo de desintegração espontânea) em um quark c . Este decai em um quark s , que, finalmente, decai em um quark u .

$$top \rightarrow beauty \rightarrow charm \rightarrow strange \rightarrow up$$

Os quarks, descobertos em 1968, são partículas muito, muito estranhas. Nunca são observados isoladamente, nunca se propagam livremente pelo espaço como as demais partículas, estão sempre presos dentro de prótons e nêutrons. Possuem uma carga elétrica que é apenas uma fração da carga do elétron. Até a descoberta dos quarks, a carga do elétron era considerada como o *quantum* de carga elétrica, ou seja, a menor quantidade de carga elétrica possível (usamos o símbolo e para representar a carga elétrica do elétron). O quark u tem carga elétrica $+2/3e$, enquanto o quark d tem carga $-1/3e$. Os prótons são estados compostos por uud , com carga elétrica total $(+2/3+2/3-1/3)e = +e$. Já os nêutrons são uma combinação de quarks udd , com

carga elétrica total $(+2/3 - 1/3 - 1/3)e = 0$. Apesar de os quarks só poderem ser observados indiretamente, sua existência é um fato bem estabelecido há mais de 50 anos.

Os léptons são completamente diferentes dos quarks, pois são partículas que podem se propagar livremente pelo espaço. Existem aceleradores que utilizam feixes de elétrons, o lépton mais conhecido. Mas é impossível fazer um feixe de quarks. Além do elétron, há também o múon e o tau. São “primos” bem mais pesados que o elétron. Elétrons, múons e taus têm a mesma carga elétrica $(-e)$. O tau e o múon são instáveis. Uma vez produzidos (em colisões ou na desintegração de partículas mais pesadas), se propagam por uma ínfima fração de segundo até se desintegrarem espontaneamente. Os taus, os léptons mais pesados, decaem em múons, e estes se desintegram dando origem a elétrons, que são estáveis. Os elétrons nunca se desintegram espontaneamente, pois não há nenhuma partícula carregada mais leve do que eles, não há como eles possam decair.

Para cada lépton carregado existe um companheiro neutro, os *neutrinos*. Assim, temos o neutrino do elétron, o neutrino do múon e o do tau, todos com carga elétrica nula. Os neutrinos são partículas com massa muito pequena, as mais leves conhecidas, e interagem tão raramente com a matéria que podem atravessar toda a extensão da Terra sem serem notados. Além disso, os neutrinos têm uma propriedade curiosa: são “monogâmicos”, cada tipo de neutrino interage apenas

com o seu lépton correspondente (neutrinos do elétron apenas com elétrons, os do múon apenas com múons etc).

Há algo extraordinário que deve ser mencionado. Tudo o que podemos ver, seja na Terra ou no Universo, toda a multiplicidade de seres vivos, rochas, rios e oceanos, estrelas, planetas e cometas, tudo é feito de átomos, os mesmos que constam da tabela periódica. Não importa para onde apontemos os telescópios, vemos sempre os mesmos elementos químicos encontrados aqui na Terra. Os átomos, como se sabe, têm um núcleo formado por prótons e nêutrons e envolvido por uma nuvem de elétrons. Os prótons e nêutrons, por sua vez, são feitos dos quarks *up* e *down*. Isso significa que *tudo o que podemos ver ao nosso redor são diferentes combinações de apenas três constituintes elementares: os quarks up e down e os elétrons!*

Nos capítulos anteriores falamos sobre a radioatividade. Vamos ver isso agora com um pouco mais de detalhe. O carbono-14, por exemplo, é um isótopo (mesmo número de prótons, mas diferente número de nêutrons) instável do carbono-12, que é a forma mais comum do carbono. Uma amostra de carbono-14 desaparece lentamente à medida que seus átomos emitem radiação e se transformam em átomos de nitrogênio. Após um certo tempo, restará apenas uma ínfima quantidade de carbono-14 da amostra inicial. À medida que o carbono-14 desaparece, em seu lugar surge o nitrogênio. O que acontece no interior de um átomo de carbono-14?

A radioatividade natural tem origem nos núcleos atômicos. O núcleo do carbono-14 é composto por seis prótons e oito nêutrons. Em um dado momento, impossível de ser previsto, um dos nêutrons se desintegra espontaneamente. É o chamado decaimento beta (β). O processo mais elementar ocorre dentro do nêutron: um dos quarks *down* se transforma em um quark *up*, $ddu \rightarrow duu$. Dentro do núcleo, o que era um nêutron agora é um próton. Essa transição vem acompanhada da emissão de um elétron e um neutrino, que são expelidos pelo núcleo. Depois da transição espontânea $d \rightarrow u$, núcleo atômico passa a ter sete prótons e sete nêutrons, e o átomo de carbono-14 se transforma em um átomo de nitrogênio.

Que força da Natureza é responsável por essa transformação? Só foi possível responder a essa pergunta de forma completa depois da descoberta dos quarks. Na visão contemporânea, as colisões entre duas partículas elementares sempre envolvem uma terceira partícula, que atua como uma espécie de mensageira.

Imagine dois patinadores que se deslocam um em direção ao outro em uma pista de patinação no gelo. Cada um carrega uma bola pesada. Quando estão próximos, cada um joga a sua bola para o outro. O impacto da troca faz com que ambos passem a se deslocar em direções diferentes (desprezando o atrito, o momento linear dos patinadores se conserva). Um exerce influência sobre o outro, mesmo que não haja contato físico entre eles. Esse exemplo ilustra uma *interação repulsiva*. Se em vez de uma bola pesada, os patinado-

res trocarem entre si uma geleca grudenta, teremos o que seria uma *interação atrativa*.

Nos processos de desintegração espontânea, a partícula original emite uma partícula mensageira ao mesmo tempo em que se transforma em outra. Seria como um patinador jogar a sua bola em uma direção qualquer e, ao se livrar dela, ele se transforma em uma outra pessoa. A “bola pesada”, no caso da desintegração espontânea do nêutron, recebe o pomposo nome de *bóson vetorial W*, uma partícula que atua como “mensageira” de uma das três forças conhecidas, a *força fraca*, o mecanismo por trás de alguns tipos de radioatividade.

O bóson W tem um tempo de vida tão curto que não permite que ele seja observado diretamente. Imediatamente, o bóson W se converte em um elétron e um neutrino. A força fraca tem também um outro tipo de mediador, o bóson Z, responsável por outra classe de reações entre partículas elementares.

Todos sabemos da existência força eletromagnética. É o tipo de força com que estamos habituados. É ela que mantém os elétrons presos aos núcleos atômicos. A força eletromagnética também tem a sua partícula mensageira: o fóton. O núcleo atômico e os elétrons trocam fótons entre si continuamente. Os fótons podem agir tanto como “bolas pesadas” como “gelecas grudentas”.

Existe ainda um terceiro tipo de força. Sabemos que cargas elétricas de mesmo sinal se repelem. Imagine um núcleo de um átomo de chumbo, contendo 82 prótons espremidos em um volume muito pequeno. Por que

a repulsão elétrica não faz o núcleo de chumbo (ou o de qualquer outro elemento químico) explodir? O que mantém o núcleo coeso?

A resposta está dentro dos prótons e nêutrons: os *glúons*, os mensageiros da chamada *força forte* (os físicos, tão criativos ao nomear os quarks, nos deram esses nomes tão pouco poéticos para as forças...).

Prótons (e nêutrons) são partículas extremamente complexas. Ainda hoje se estuda o que acontece no interior dessas partículas. Os prótons são compostos por três quarks, *uud*. Mas a soma das massas dos três quarks corresponde a apenas 1% da massa do próton. Os 99% restantes vêm da energia dos glúons, que mantêm os quarks aprisionados. Mais uma demonstração de que massa e energia se equivalem, $E = mc^2$.

A força forte é atrativa e muito mais intensa que a eletromagnética. Dentro dos prótons e nêutrons, os quarks estão permanentemente trocando glúons entre si, e isso os mantêm permanentemente confinados. Prótons e nêutrons são mais parecidas com nuvens difusas do que com bolinhas com superfície bem definida. Dentro do núcleo, as nuvens se superpõem, e a força forte mantém todas as partículas juntas.

Talvez você estranhe a ausência da gravidade, que seria uma quarta força. Mas Einstein mostrou em 1915 que a gravidade é um efeito geométrico, pois tanto a matéria como a energia deformam as propriedades do espaço. A gravidade não é uma força, apesar de estarmos sempre presos à superfície da Terra.

Resumindo: existem 12 partículas elementares, divididas entre quarks e léptons, que interagem entre si de três formas, as três forças, ou interações fundamentais. Em ordem crescente de intensidade, temos a força fraca, muito mais fraca do que a força eletromagnética, que por sua vez é muito mais fraca que a força forte. São mediadas, respectivamente, pelos bósons W e Z , pelos fótons e pelos glúons.

Mas falta a cereja do bolo: o bóson de Higgs, descoberto no CERN (Suíça) em 2012. Houve um grande alvoroço com o anúncio da descoberta. O bóson de Higgs apareceu em todos os jornais do mundo, inclusive no jornalzinho da creche do meu filho. A euforia com a descoberta do bóson de Higgs se justifica porque a existência dessa partícula comprova o mecanismo pelo qual as partículas elementares adquirem suas massas, explica como os bósons W^\pm e Z^0 têm massa e os fótons não.

Tudo o que falamos neste breve capítulo está resumido no Modelo Padrão (MP) das partículas elementares. Na Fig. 37, vemos a “nova tabela periódica”. Para cada quark ou lépton existe uma antipartícula, isto é, um antiquark e um antilépton. As antipartículas nada mais são do que espelhos das partículas, com as mesmas propriedades exceto as cargas, que têm sinal trocado. O pósitron é o antielétron, igualzinho a um elétron, mas com carga elétrica positiva.

A MQ é uma teoria não relativística. Isso significa que só é aplicável a objetos que se movam com velocidades pequenas comparadas a da luz. A versão da MQ

que satisfaz os princípios da Teoria da Relatividade foi feita em 1927 por Paul Dirac, um dos mais brilhantes físicos do século passado. Em seguida, o Eletromagnetismo foi acrescentado, dando origem à Eletrodinâmica Quântica, uma das três teorias que compõem o MP.

A Eletrodinâmica Quântica é a teoria física mais precisa já criada. Para se ter uma ideia, a teoria prevê propriedades do elétron cujos valores diferem do valor medido apenas na décima terceira casa decimal. É como se medíssemos a distância entre a Terra e a Lua com a precisão de um fio de cabelo! A estrutura matemática da Eletrodinâmica Quântica serviu de modelo para o desenvolvimento das outras duas teorias, as das interações fracas e fortes. Assim, o MP é o conjunto de três teorias diferentes, reunidas sob um mesmo arcabouço matemático.

A MQ tem outra limitação: descreve sistemas em que o número de partículas permanece constante ao longo de sua evolução no tempo. Acontece que em colisões muito violentas entre duas partículas, como nos experimento do LHC, no CERN, muitas outras são criadas. Os físicos teóricos criaram uma versão da MQ para ser usada na descrição de processos em que novas partículas são criadas. Trata-se da Teoria Quântica de Campos.

O MP, portanto, reúne três teorias quânticas de campos. Até o momento, nenhum experimento realizado em qualquer laboratório do mundo encontrou uma falha no MP. Mas evidências vindas do céu mostram que o MP é *incompleto*. Sabemos que há mais coisas do que

as que estão contidas no MP. Por exemplo, há algumas décadas sabemos o Universo contém um tipo misterioso de matéria que não interage de nenhuma forma conhecida, a *matéria escura*, cuja natureza ignoramos. Sua existência foi revelada pelos efeitos gravitacionais que ela causa. Há cerca de cinco vezes mais matéria escura do que a matéria ordinária, feita de prótons, nêutrons e elétrons. Muitos físicos se empenham hoje em entender. A aventura intelectual continua.

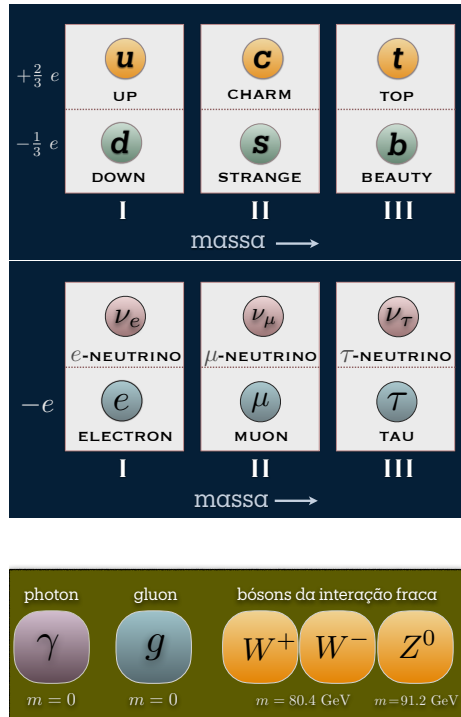


Figura 37: O Modelo Padrão divide as partículas elementares entre constituintes – quarks e léptons – e mediadoras – os bósons vetoriais. A existência do bóson de Higgs comprova o mecanismo pelo qual as partículas elementares adquirem suas massas.

Epílogo

A maneira de ver o mundo natural mudou radicalmente no final dos anos 1800. As teorias físicas daquela época compartilhavam alguns princípios básicos: causalidade, localidade, determinismo e continuidade. Esses princípios formam a base da Mecânica de Newton, do Eletromagnetismo de Maxwell e da Termodinâmica, o que chamamos de Física Clássica.

Todo efeito é precedido por uma causa. Começamos a ver o mundo dessa forma desde que nascemos, por isso a frase soa como uma obviedade. Mas no microcosmo não é assim. Pense na radioatividade. Os núcleos atômicos de elementos radioativos são instáveis, e se desintegram espontaneamente, sem uma causa aparente. Os decaimentos ocorrem ao acaso, não é possível prever quando uma partícula se desintegrará. Mas se observarmos durante algum tempo uma amostra de uma substância radioativa que tenha um número muito grande de átomos, veremos que os decaimentos acontecem em um ritmo que segue uma lei matemática simples. Decaimento, ou desintegração espontânea é exatamente isso: um efeito que não é precedido por uma causa. A natureza probabilística do microcosmo se revela nesse exemplo.

É, naturalmente, impossível que ao ler um livro eu interfira no banho de alguém que mora do outro lado da rua. Somos afetados apenas por aquilo que nos cerca, pelo nosso entorno imediato. Este é o princípio da

localidade, que também soa bastante óbvio. Mas vimos o quão bizarro é o emaranhamento, ou entrelaçamento quântico de dois fótons, dois *spins* etc. Um vínculo estabelecido na origem comum de duas partículas permanece enquanto elas não interagirem com o ambiente, mesmo que estejam em extremos opostos da Via Láctea. Quando uma medição é feita em uma delas, o seu estado quântico é determinado. Instantaneamente, o estado quântico da outra partícula fica definido. Quando o detector oposto realiza a mesma medição sobre a outra partícula só pode haver uma única resposta. Não se trata de informação viajando com uma velocidade maior que a da luz. No microcosmo, as partículas emaranhadas formam um único sistema quântico, impossível de ser decomposto em suas partes. A correlação entre as partículas independe da distância entre elas. O mundo quântico é não-local.

As leis de Newton são *causais*: $\vec{F} = m\vec{a}$ estabelece a relação entre causa, a força \vec{F} , e o seu efeito, a aceleração \vec{a} , sobre um corpo de massa m . Conhecendo as forças que agem sobre um objeto, bem como a sua posição e velocidade no presente, podemos determinar sua posição e velocidade em qualquer instante no futuro. A trajetória do objeto é bem determinada pela segunda lei de Newton. Assim, se pudéssemos aplicar esse princípio a todas as partículas que compõem o Universo, poderíamos determinar como seria o futuro. O mundo perderia a graça. Na visão da Física Clássica, o único impedimento para que isso aconteça seria a impossibilidade de saber as posições e velocidades de

todas as partículas do Universo, no presente, e as forças que atuam sobre cada uma.

O determinismo é uma característica fundamental da Física Clássica. Mas, como vimos, no mundo quântico, não existe o conceito de trajetória. O determinismo cede lugar à incerteza, uma característica marcante do microcosmo. Não podemos seguir um elétron em um átomo, é impossível acompanhar o seu percurso em uma transição entre dois níveis de energia. No mundo quântico, a Natureza dá saltos.

A continuidade do mundo macroscópico é apenas uma ilusão dos nossos sentidos. Tudo o que vemos é feito de átomos, que não se tocam. Na Física, a continuidade significa termos o poder de elevar a temperatura de um corpo adicionando a ele quantidades de energia tão pequenas quanto queiramos, ou executar uma rotação fazendo um corpo girar gradativamente em passos tão pequenos quanto podemos imaginar. O corpo negro e o efeito fotoelétrico mostraram pela primeira vez que o mundo microscópico é descontínuo.

Na base de tudo isso está a natureza ondulatória da matéria, a chamada dualidade onda-partícula, tão claramente demonstrada nos experimentos de dupla fenda. Seus efeitos sobre objetos macroscópicos são imperceptíveis, mas a dualidade se manifesta em inúmeras situações quando observamos a Natureza de muito perto. Não existe uma fronteira bem definida separando o mundo clássico do mundo quântico, quando o microscópico se torna macroscópico. Os físicos seguem estudando esse limite.

Se você leu esse pequeno livro até esta linha, provavelmente entende o papel fundamental de Ciência no desenvolvimento da civilização. A curiosidade é um dos motores da Humanidade, nunca a perca!